

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Renato Špiranec

Zagreb, 2018. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Student:

Renato Špiranec

Zagreb, 2018. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof.dr.sc Veri Rede na strpljenju, ukazanom znanju i pomoći u svakom obliku.

Zahvaljujem se prof. Janošu Kodvanju i poslijedoktorantu Martinu Šurjaku na vremenu koje je izdvojio za ispitivanje naših uzoraka na kidalici.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji koja me pratila kroz čitavi studij, a posebno bi se zahvalio svojem djedu kojem ovo više znači nego meni.

Renato Špiranec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Renato Špiranec

Mat. br.: 0035194995

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Savojna čvrstoća drva hrasta u longitudinalnom smjeru

Naslov rada na engleskom jeziku: Bending strength of oak wood in the longitudinal direction

Opis zadatka:

Mehanička svojstva tehničkih materijala određena su njihovim kemijskim sastavom i mikrostrukturnim stanjem. Uz isti kemijski sastav moguća su različita mikrostrukturna stanja, a onda i različita mehanička svojstva. Za mnoge tehničke materijale karakteristična je anizotropnost ili usmjerenost strukture u pojedinim osima, što za posljedicu ima razliku u vrijednostima istog svojstva u različitim pravcima. Prirodni biokompozit drvo ima izrazito usmjerenu mikrostrukturu i vrlo različita svojstva u tri osnovna presjeka: longitudinalnom, radijalnom i tangencionalnom. Za drvo su također karakteristične velike razlike u svojstvima između pojedinih vrsta, kao i velika rasipanja rezultata unutar iste vrste pa čak i unutar istog debla.

U završnom radu potrebno je odrediti savojnu čvrstoću za drvo hrasta u longitudinalnom smjeru. Ispitivanje treba provesti metodom savijanja u tri točke, a dobivene rezultate statistički obraditi. Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadala:

Izv. prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OSNOVNA GRAĐA DRVNE STANICE | 4 |
| 3. STRUKTURA I SVOJSTVA MATERIJALA | 6 |
| 3.1 Kemijski sastav i struktura materijala | 6 |
| 3.1.1 Struktura debla | 7 |
| 3.1.1.1 Godovi | 8 |
| 4. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA | 10 |
| 4.1 Modul elastičnosti | 10 |
| 4.2 Savojna čvrstoća | 11 |
| 4.3 Tlačna čvrstoća | 13 |
| 4.4 Smična čvrstoća | 14 |
| 4.5 Vlačna čvrstoća | 15 |
| 4.6 Žilavost | 16 |
| 4.7 Lomna žilavost | 18 |
| 4.8 Tvrdoća | 19 |
| 5. HRAST LUŽNJAK | 22 |
| 6. EKSPERIMENTALNA METODA | 24 |
| 6.1 Priprema uzorka | 24 |
| 6.2 Ispitivanje savojne čvrstoće | 31 |
| 6.3 Ispitivanje prve serije uzoraka sa savojnom silom koja je paralelna s godovima | 33 |
| 6.4 Ispitivanje druge serije uzoraka sa savojnom silom koja je okomita na godove | 35 |
| 6.5 Ispitivanje treće serije uzoraka sa savojnom silom koja je pod kutem od 45° u odnosu na tijek godova | 37 |
| 6.6 Analiza vrijednosti savojne čvrstoće Weibullovom razdiobom | 40 |
| 7. ZAKLJUČAK | 46 |
| 8. LITERATURA | 47 |

POPIS SLIKA

| | | |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1.1 | Drveno oružje i oruđe..... | 1 |
| Slika 1.2 | Spačvanska šuma | 2 |
| Slika 1.3 | Tijek reciklaže | 3 |
| Slika 1.4 | Mapa Spačvanske šume | 3 |
| Slika 2.1 | Građa stanične stijenke..... | 4 |
| Slika 2.2 | Model stanične stijenke četinjače | 5 |
| Slika 3.1 | Građa celuloze | 6 |
| Slika 3.2 | Građa i uloga stabla..... | 7 |
| Slika 3.3 | Građa debla..... | 8 |
| Slika 3.4 | Izgled godova na presjeku debla..... | 9 |
| Slika 4.1 | Specifična krutost drva i drugih tehničkih materijala | 11 |
| Slika 4.2 | Metoda savijanja u tri točke | 12 |
| Slika 4.2 | Metoda savijanja u tri točke | 12 |
| Slika 4.3 | Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile..... | 13 |
| Slika 4.4 | Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće | 14 |
| Slika 4.5 | Shematski prikaz ispitivanja smične čvrstoće | 15 |
| Slika 4.6 | Odnos vlačne čvrstoće i gustoće za drvo i druge tehničke materijale | 16 |
| Slika 4.7 | Charpy-ev bat, uređaj za ispitivanje žilavosti..... | 17 |
| Slika 4.8 | Odnos čvrstoće i žilavosti za drvo i druge tehničke materijale | 18 |
| Slika 4.9 | Tri osnovna načina otvaranja pukotine prema Irwinu (a) i šest mogućih sustava otvaranja pukotine u drvu (b)..... | 19 |
| Slika 4.10 | Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Jankovom metodom | 20 |
| Slika 4.11 | Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom | 21 |
| Slika 5.1 | Hrast lužnjak..... | 22 |
| Slika 5.2 | Plod hrasta lužnjaka | 23 |
| Slika 6.1 | Uređaj namijenjen za brušenje materijala | 25 |
| Slika 6.2 | Brusni papir oznake P 800..... | 26 |
| Slika 6.3 | Brusni papir oznake P 80..... | 27 |
| Slika 6.4 | Raspored epruveta s obzirom na tijek godova..... | 28 |
| Slika 6.5 | Pomoćno mjerilo kojim smo mjerili dimenzije epruveta | 29 |
| Slika 6.6 | Oznaka i mjerenje dimenzija epruveta..... | 31 |
| Slika 6.7 | Kidalice Messphysik BETA 50-5 | 32 |
| Slika 6.8 | Dijagram naprezanja – progib za epruvete skupine A | 35 |
| Slika 6.9 | Dijagram naprezanje – progib za epruvete skupine B | 37 |
| Slika 6.10 | Dijagram naprezanje – progib za epruvete skupine C | 39 |
| Slika 6.11 | Prikaz ovisnost modula (m) na krivulju Weibellove razdiobe | 40 |
| Slika 6.12 | Prikaz komulativne razdiobe podataka za savojne čvrstoće A skupine uzoraka..... | 41 |
| Slika 6.13 | Prikaz regresijske jednadžbe savojne čvrstoće za A skupinu uzoraka | 42 |
| Slika 6.14 | Prikaz komulativne razdiobe podataka za savojne čvrstoće B skupine uzoraka | 43 |
| Slika 6.15 | Prikaz regresijske jednadžbe savojne čvrstoće za B skupinu uzoraka..... | 44 |
| Slika 6.16 | Prikaz komulativne razdiobe podataka za savojnu čvrstoću C skupine uzoraka | 44 |
| Slika 6.17 | Prikaz regresijske jednadžbe savojne čvrstoće za A skupinu uzoraka | 45 |

POPIS TABLICA

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1 | Prikaz vrijednosti modula elastičnosti nekih materijala..... | 11 |
| Tablica 2 | Vrijednosti dimenzija svih epruveta za ispitivanje | 30 |
| Tablica 3 | Oznake veličina i mjernih veličina | 33 |
| Tablica 4 | Rezultati ispitivanja epruveta skupine A..... | 33 |
| Tablica 5 | Rezultat ispitivanja epruveta skupine B | 36 |
| Tablica 6 | Rezultati ispitivanja epruveta skupine C..... | 38 |

POPIS OZNAKA

| OZNAKA | JEDINICA | OPIS |
|---------------|-----------------|------------------------------------------|
| A_0 | mm^2 | površina presjeka |
| F_{\max} | N | maksimalna sila |
| H_j | N | tvrdća po Janki |
| H_b | N/mm^2 | tvrdća po Brinellu |
| m_1 | g | masa drva kod nekog sadržaja vlage |
| m_2 | g | masa drva u apsolutno suhom stanju |
| R_m | N/mm^2 | vlačna čvrstoća |
| R_{ms} | N/mm^2 | savojna čvrstoća |
| $R_{m\tau}$ | N/mm^2 | smična čvrstoća |
| σ_{pm} | N/mm^2 | tlačna čvrstoća |
| ρ_0 | g/cm^3 | gustoća drva u apsolutno suhom stanju |
| ρ_w | g/cm^3 | gustoća drva pri određenom stupnju vlage |
| B | mm | širina uzorka |
| D | mm | promjer otiska |
| D | mm | promjer kuglice |
| E | N/mm^2 | modul elastičnosti |
| F | N | Sila |
| G | N | Težina |
| H | mm | visina uzorka |
| L | mm | razmak između oslonaca |
| M | g | masa uzorka |
| V | cm^3 | volumen uzorka |
| ρ | g/cm^3 | Gustoća |

SAŽETAK

Drvo je prirodni biokompozitni materijal s izrazito usmjerenom mikrostrukturom što za posljedicu ima i veliku usmjerenost svojstava u tri glavne osi: radijalnoj, longitudinalnoj i tangencijalnoj. Svojstva se razlikuju od vrste do vrste, a velike razlike mogu biti i unutar istog debla. Zbog svega navedenog, pri ispitivanju bilo kojeg mehaničkog svojstva, potrebno je napraviti veliki broj mjerenja da bi se dobili pouzdani rezultati.

U ovom završnom radu određena je savojna čvrstoća hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru metodom savijanja u tri točke. Također je određen utjecaj kuta između savojne sile i tijeka godova na visinu savojne čvrstoće (0° , 45° i 90°). Dobiveni rezultati pokazuju da je ukupna srednja vrijednost savojne čvrstoće hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru iznosi $173,7 \text{ N/mm}^2$ i nešto je viša od vrijednosti koje se za istu vrstu mogu naći u literaturi. Također se pokazalo da kut između savojne sile i linije godova vrlo malo utječe na vrijednost savojne čvrstoće. Najviše vrijednosti su dobivene za kut od 0° gdje srednja vrijednost savojne čvrstoće iznosi $175,3 \text{ N/mm}^2$, a najmanje vrijednosti za kut od 45° gdje je srednja vrijednost $172,6 \text{ N/mm}^2$. Srednja vrijednost savojne čvrstoće za kut od 90° iznosi $173,2 \text{ N/mm}^2$.

Statistička analiza pokazala je da se dobiveni rezultati ponašaju po zakonu Weibullove razdiobe, te da je vrijednosti Weibullovog modula visoka za sve tri skupine uzoraka.

SUMMARY

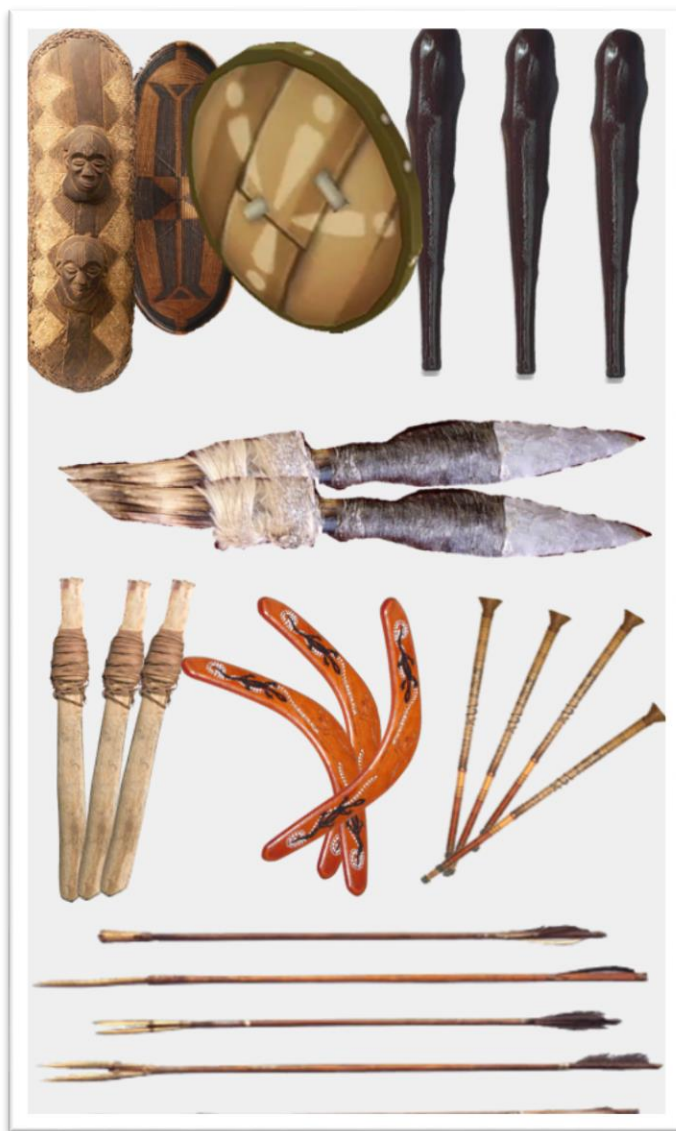
Wood is a natural biocomposite material with a highly directed microstructure and, therefore, properties that vary in the three principal axes: radial, longitudinal and tangential. Properties vary not only within the wood species, but also within the tree trunk. Consequently, a large number of measurements are required to obtain reliable results for any mechanical property.

In this work, the bending strength of the oak in the longitudinal direction was determined by the three-point bending test. Also, the effect of the angles between the direction of load and annual rings' orientation (0° , 45° i 90°) on the bending strength was determined. According to the obtained results, the mean bending strength of the oak was found to be 173.7 N/mm^2 and it is slightly higher than the values that can be found for the same species in the literature. This investigation has shown that load-to- annual ring direction slightly effected the bending value. The highest value was obtained at angle of 0° where the mean bending strength was found to be 175.3 N/mm^2 and the lowest value was obtained at angle of 45° where the mean bending strength was found to be 172.6 N/mm^2 . The mean bending strength at angle of 90° was 173.2 N/mm^2 .

Statistical analysis has shown that the obtained results follow Weibull distribution and the Weibull modulus values of three measured groups are high.

1. UVOD

Drvo je jedan od prvih tehničkih materijala uz kamen i glinu koji je imao jako značajnu ulogu u povijesti. Počevši od izrade prvih oružja i oruđa pa sve do danas za različite primjene i proizvode. Neke od najpoznatijih primjena su da se drvo koristi kao sirovina u industriji i za ogrjev, no također se koristi i za izradu odjevnih predmeta. Slika 1.1 prikazuje prva oružja i oruđa izrađena od drva.



Slika 1.1 Drveno oružje i oruđe, [17]

Šume imaju jako velik utjecaj na kvalitetu ljudskog života i ekosustav, stoga bi se svaka država trebala više raditi po tom pitanju. Neki od najvažnijih utjecaja šuma su:

- proizvode kisik

- zadržavaju vodu u tlu
- povoljan utjecaj na klimu

Slika 1.2 prikazuje jedan dio Spačvanske šume.



Slika 1.2 Spačvanska šuma, [19]

Drvo je jako poseban tehnički materijal zbog svojih specifičnih svojstava:

- prirodan
- obnovljiv
- reciklaban
- anizotropan
- porozan
- itd.

Iz drva se proizvodi papir, neizostavna roba u današnje vrijeme. Opće je poznato kako papir možemo reciklirati, a proces je prikazan na Slika 1.3, što koincidencijom govori kako je i samo drvo reciklaban materijal. Potrebno je dobro poznavati strukturu i svojstva drva kako bi se ono moglo što bolje iskoristiti, odnosno primijeniti u određenu svrhu. Također njegova svojstva se mogu poboljšati raznoraznim kemijskim i fizikalnim postupcima.



Slika 1.3 Tijek reciklaže

Za ispitivanje su korišteni uzorci izrezani iz hrasta lužnjaka, posječenog u šumi Spačva i sušenog u natkrivenom prostoru unazad 7 godina. Spačvanski bazen je najveći kompleks nizinskih šuma hrasta lužnjaka. Nalazi se između rijeka Spačve i Studve. Slika 1.4 prikazuje točan geografski položaj Spačvanske šume. Spačvanski bazen prostire se na ukupno 51 000 hektara – a kako je to najveći kompleks hrasta lužnjaka, u njemu se nalazi 1/5 ukupne površine pod hrastom lužnjakom u cijeloj Republici Hrvatskoj.



Slika 1.4 Mapa Spačvanske šume, [18]

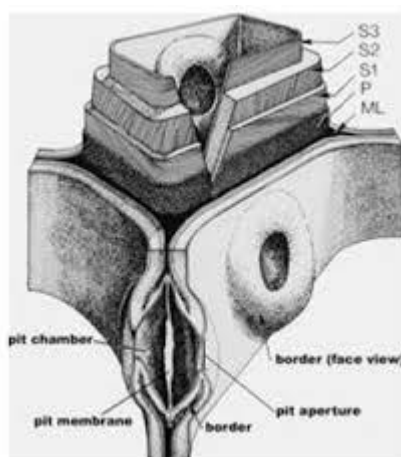
Hrast lužnjak karakteriziraju njegova finoća, zlatnožuta boja, jednostavna obrada i pravilnost godova. Prilikom ispitivanja, uzorci su podijeljeni prema smjeru godova u 3 skupine: 0°, 45° i 90°. Uzorci su prvo izrezani, a zatim brušenjem dovedeni do željenog oblika i dimenzija, te im je na kidalici određena savojna čvrstoća.

2. OSNOVNA GRAĐA DRVNE STANICE

Drvena stanica sastoji se od stanične stijenke i lumena.

Glavna funkcija stanične stijenke je da daje strukturnu potpuru i mehaničku zaštitu stanici, dok je glavna uloga lumena provođenje vode.

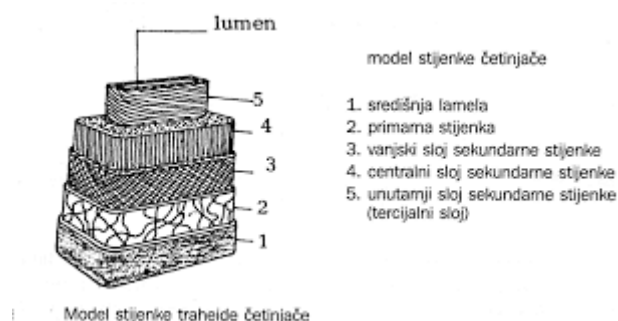
Stanična stijenka je relativno čvrst omotač koji obavija stanicu i nalazi se sa vanjske strane stanične membrane. Stanična stijenka nije organel već mrtva struktura koja izlučuje citoplazmu. Sastavljena je od tri glavna dijela: središnje lamele, primarnog i sekundarnog dijela stijenke. Sva tri dijela izgrađena su od celuloze, hemiceluloze te pektina i lignina. Slika 2.1 pokazuje građu stanične drvene stijenke po slojevima.



Slika 2.1 Građa stanične stijenke, [2]

Slika 2.2 prikazuje model stijenke četinjače. Preko središnje lamele susjedne stanice su povezane u jedinstvenu cjelinu, čime je omogućeno njihovo normalno funkcioniranje – provođenje vode i biokemijskih tvari. Na središnju lamelu nastavlja se primarna stanična stijenka (P) sačinjena od dugih mikro-vlakana celuloze. Primarna stijenka je vrlo tanka i teško ju je razlučiti od središnje lamele. Na primarnu stijenku nastavlja se sekundarna stijenka (S) sastavljena od tri sloja različite debljine. Prvi sloj sekundarne stijenke (S1) je relativno tanak. Drugi sloj (S2) je najdeblji sloj sekundarne stijenke i u velikoj mjeri određuje svojstva same stanične stijenke, ali i svojstva drva na makroskopskoj razini. Udio lignina je manji nego u središnjoj lameli i primarnoj stijenci. Ispod sloja S2 nalazi se treći sloj sekundarne stanične

stijenke, (S3), koji sadrži još manje lignina, relativno je tanak. Lignin je građen od hidrofobnih makromolekula, a od središnje lamele prema lumen njegov sadržaj se postupno smanjuje da bi se olakšao provod vode i transpiracija u živom drvu.



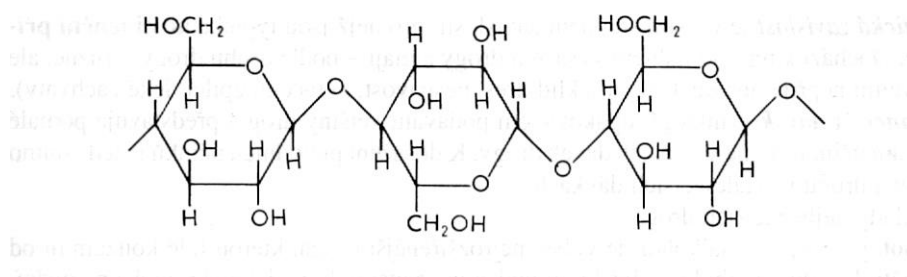
Slika 2.2 Model stanične stijenke četinjače, [2]

3. STRUKTURA I SVOJSTVA MATERIJALA

3.1 Kemijski sastav i struktura materijala

Drvo je kompozit sastavljen od celuloze, hemiceluloze i lignina te nekih anorganskih tvari koje su zanemarive zbog svoje male količine. Celuloza je po kemijskom sastavu ugljikohidratni polimer, a ujedno je i najrašireniji organski spoj na Zemlji. Ima visok stupanj polimerizacije (oko 10 000) i ne topiva je u većini otapala. Hemiceluloza je također ugljikohidratni polimer, ali malog stupnja polimerizacije (100-200) i lako se otapa u lužinama. Lignin je amorfni, visokokompleksni, najčešće aromatski trodimenzionalni polimer izgrađenih od fenilpropanskih jedinica, a njegova osnovna uloga je povećanje krutosti i stabilnosti stanične stijenke. Na Slika 3.1 je prikazana struktura celuloze.

Celuloza (polysacharid)



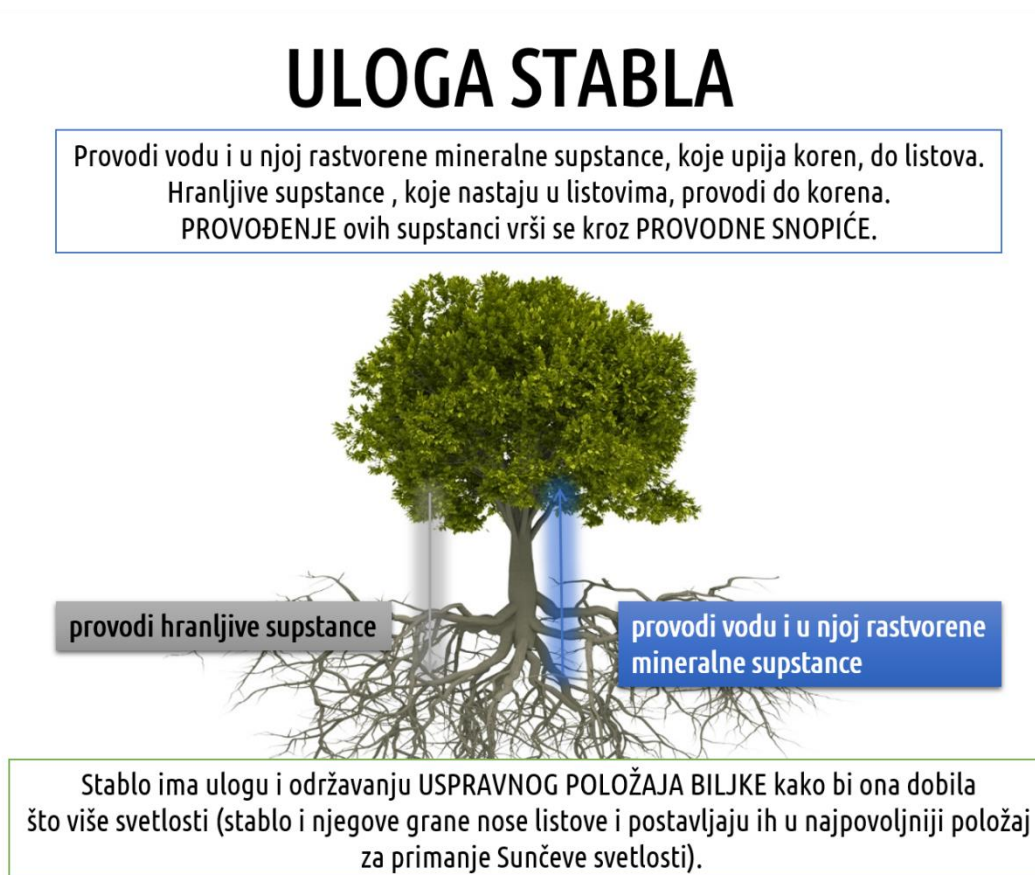
Slika 3.1 Građa celuloze, [3]

Stanična stijenka sastoji se od ugljikohidrata (65-75%) i lignina (18-35%).

Osnovna podjela vrsta drva je na četinjače i listače. Iako to nema nekakve veze s njihovom tvrdoćom, drvo četinjača još nazivamo meko drvo, a drvo listača tvrdo drvo. Razlika između četinjača i listača je u tome što su četinjače malobrojne po broju vrsta, dok je za listače poznato oko 2000 vrsta drva. Četinjače spadaju u skupinu golosjemenjača, a najpoznatije su: jela (*Abies*), smreka (*Picea*) i bor (*Pinus*). Listače spadaju u skupinu kritosjemenjača, a najpoznatije su: bukva (*Fagus*), hrast (*Quercus*) i breza (*Betula*).

Svako stablo sastoji se od: korijena, debla i krošnje. Korijen stabla nalazi se ispod zemlje, a primarna uloga mu je da drži stablo i apsorbira vodu i mineralne tvari. Kroz deblo stabla se provode voda i mineralne tvari iz korijena sve do krošnje, točnije svakog lista, a služi još da

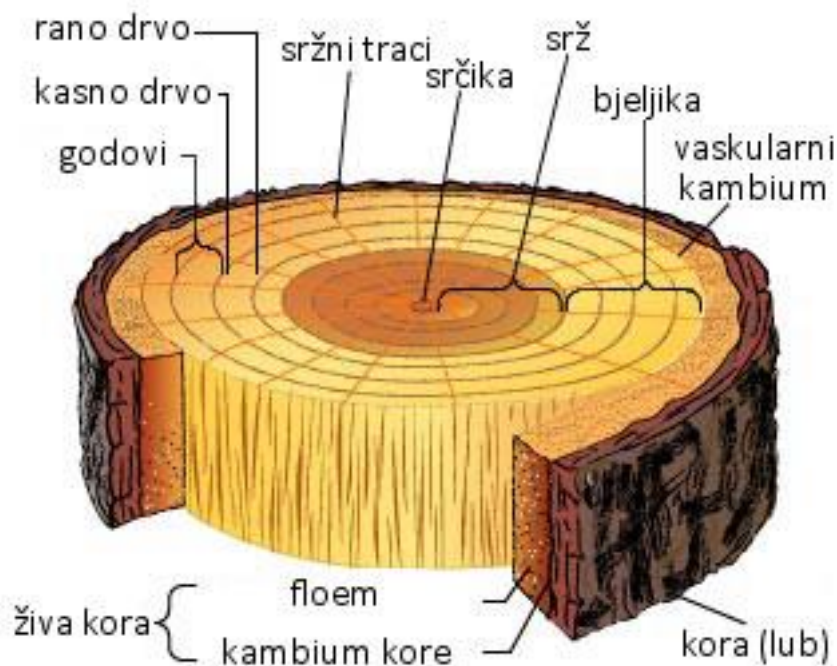
sačuva sve rezerve tvari u sebi. Krošnja se sastoji od grana različitih veličina i dužina, na kojima imamo izboje i lišće. Slika 3.2 prikazuje izgled i ulogu drva.



Slika 3.2 Građa i uloga stabla, [17]

3.1.1 Struktura debla

Deblo se sastoji od vanjske kore, unutarnje kore, kambija, bjeljike, srži i srčike, što je prikazano na Slika 3.3. Vanjska kora služi kako bi zaštitila drvo od vanjskih utjecaja. Nakon vanjske kore slijedi unutarnja kora kojoj je glavna uloga da procesuiru i transportira produkte fotosinteze iz listova prema korijenu. Zatim nam slijedi kambij koji je vrlo tanak, zapravo nam kambij u deblu izgleda kao koncentrični prsten, a iz njega se prema unutra razvija novi sloj drva, dok se prema van razvija unutarnja kora. Slijedi bjeljika kojoj je glavna uloga da provodi vodu i mineralne tvari do lišća. Bjeljika utječe na dugotajnost drveta i to pohranom škroba, lipida i ostalih rezervnih tvari. U samom središtu debla se nalaze srž i srčika. Srž je tamnije boje i u njoj su nataloženi ekstraktivi, a srčika je ostatak tkiva iz ranijih faza dok se deblo još nije razvilo.



Slika 3.3 Građa debla, [20]

3.1.1.1 Godovi

Rast drveta možemo podijeliti na primarni i sekundarni rast. Primarni rast je rast drva u visinu, dok je sekundarni rast drva, rast u širinu. Za sekundarni rast se brine kambij čije djelovanje može biti kontinuirano i diskontinuirano. Diskontinuirano djelovanje kambija, započinje u proljeće i završava najkasnije u jesen. Prirast sekundarnog ksilema koji u tom razdoblju nastane zove se god. Kontinuirano djelovanja kambija imamo samo u vlažnim tropskim šumama. Stanice nastale na početku vegetacijske sezone se zovu rani dio goda, a stanice koje su nastale kasnije se nazivaju kasni dio goda. Vrste drva s obzirom na izgled ranog i kasnog goda se može podijeliti u tri skupine:

- Nema razlike u izgledu između ranog i kasnog dijela goda
- Unutarnji promjer drvne stanice postepeno se smanjuje od ranog prema kasnom dijelu goda
- Unutarnji promjer drvne stanice naglo se smanjuje od ranog prema kasnom dijelu goda

Četinjače imaju jednostavniju građu od listača. Listače se od četinjača razlikuju po velikim provodnim sudovima – trahejama. Trajehe mogu biti raspoređene ravnomjerno ili grupirane

samo u ranom dijelu goda. Godovi se mogu razlikovati po boji, po širini i po tijeku granične linije.

Po boji mogu biti : svjetliji i tamniji

Po širini mogu biti : fini ili uski (do 1/3 cm), polu-fini ili srednje široki (1/3 do 2/3 cm) i grubi ili široki (više od 2/3 cm)

Po tijeku granične linije mogu biti : paralelni, valoviti i uleknuti s periferijom poprečnog presjeka debla.

Slika 3.4 prikazuje raspored godova na presjeku debla hrasta lužnjaka.



Slika 3.4 Izgled godova na presjeku debla, [18]

4. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

4.1 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti je jedno od najvažnijih mehaničkih svojstava drva. Ovisi o jačini veza između atoma, a predstavlja otpor materijala prema elastičnoj deformaciji. Modul elastičnosti dosta ovisi o samoj strukturi materijala, ali na njega utječu i vanjski uvjeti poput vlage i temperature. Kako modul elastičnosti ovisi pretežito o strukturi materijala, on će se razlikovati za različite vrste drveta. Vrijednost modula elastičnosti jako ovisi i o usmjerenosti mikrostrukture, odnosno o položaju ispitnog uzorka u odnosu na tri glavne osi: L, R i T. Stoga i unutar iste vrste drva možemo imati velika rasipanja u rezultatima. Također je poznato da na vrijednost modula elastičnosti u longitudinalnoj osi može utjecati kut između sile i godova.

Vrijednost modula elastičnosti računa se prema izrazu (1.1) :

$$E = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)}, \text{ N/mm}^2 \quad (1.1)$$

gdje je:

L – razmak između oslonaca u mm

b – širina uzorka u mm

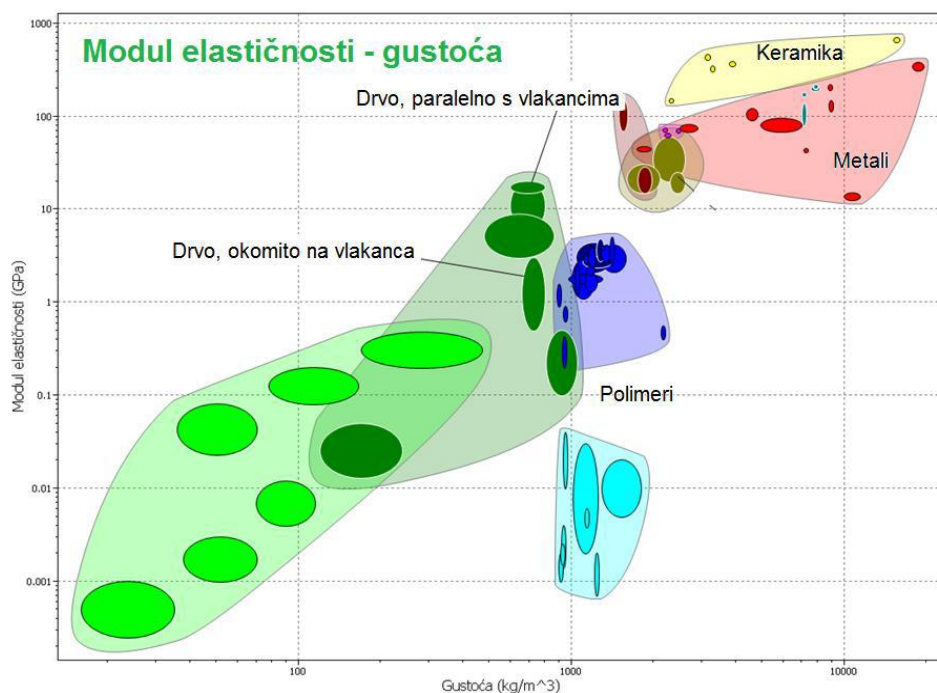
h – visina uzorka u mm

$(F_2 - F_1)$ - prirast sile u području gdje je ovisnost sila-progib linearna

$(a_2 - a_1)$ - prirast progiba (odgovara razlici $F_2 - F_1$)

$F_1 \approx 0.1 F_{\max}$ i $F_2 \approx 0.1 F_{\max}$

Slika 4.1 shematski prikazuje raspored drva i drugih tehničkih materijala s obzirom na njihovu specifičnu krutost. Dok su u Tablica 1 navedene vrijednosti modula elastičnosti nekih materijala



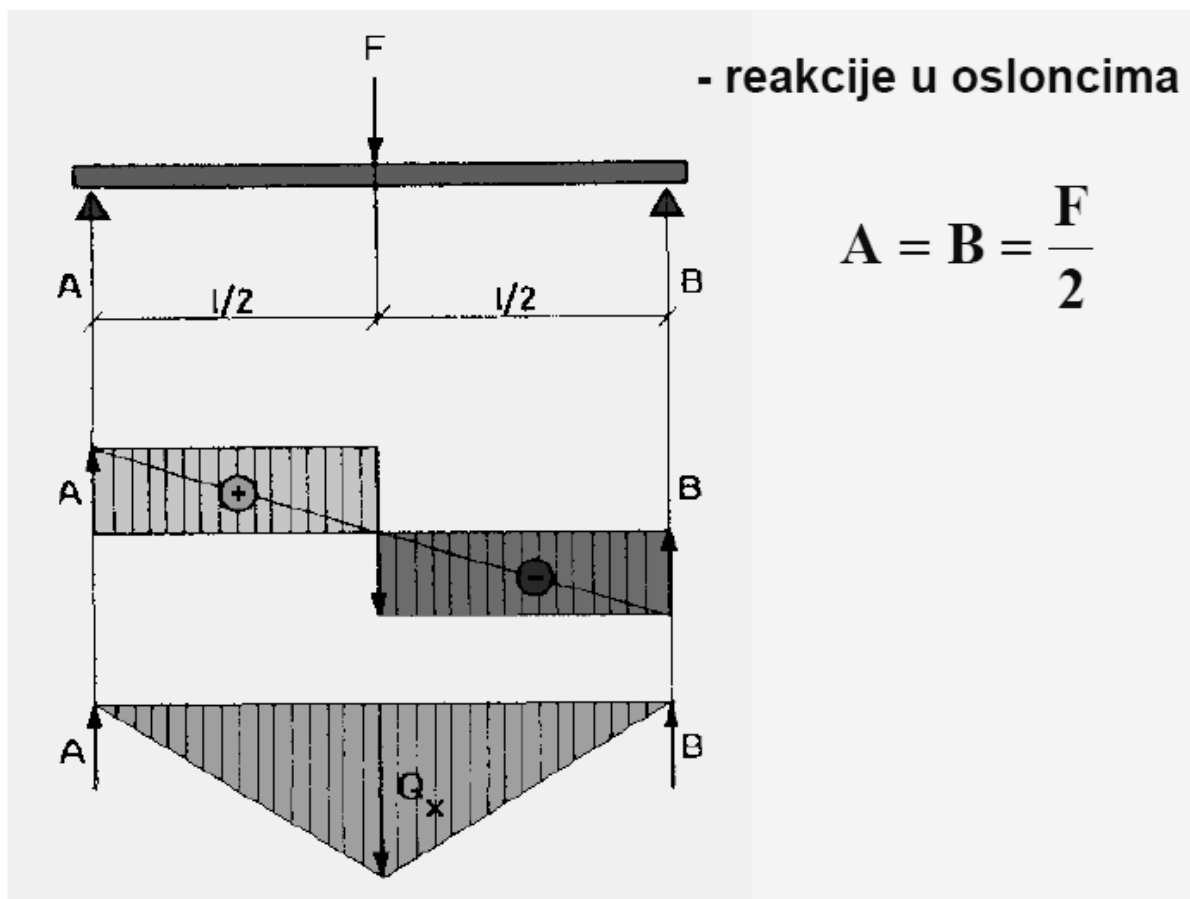
Slika 4.1 Specifična krutost drva i drugih tehničkih materijala, [21]

Tablica 1 Prikaz vrijednosti modula elastičnosti nekih materijala

| Materijal | GPa |
|---------------|-------|
| Najlon | 2-4 |
| Hrastovo drvo | 11 |
| Beton | 30 |
| Aluminij | 69 |
| Staklo | 50-90 |

4.2 Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća je jedno od češće određivanih mehaničkih svojstava drva. Ono se najčešće provodi metodom savijanja u tri točke, što prikazuje Slika 4.2. Kod metode savijanja u tri točke imamo dva oslonca svaki na jednom kraju uzorka, te savojnu silu koja djeluje na sredini uzorka. Ispitne uzorke opterećujemo do pojave loma. Vrijednost savojne čvrstoće ovisi o usmjerenosti strukture, najviša je u longitudinalnom smjeru, a kod nekih vrsta ovisi i o kutu koji zatvaraju savojna sila i linije goda.



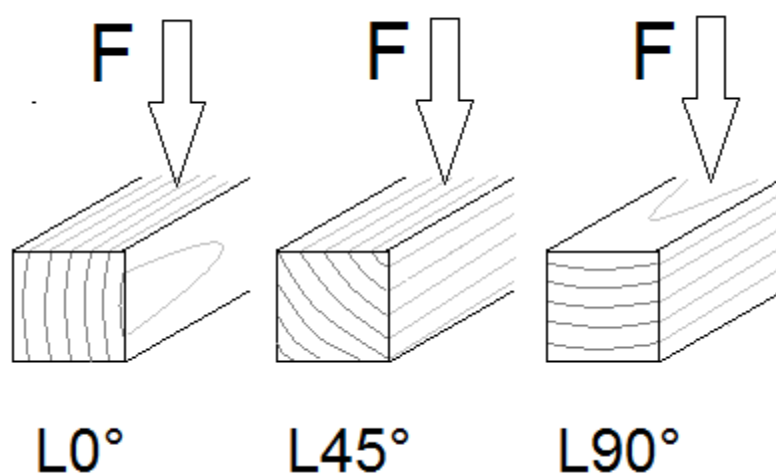
Slika 4.2 Metoda savijanja u tri točke

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu (1.2) :

$$R_{ms} = \frac{3F_{max} \cdot L}{2b \cdot h^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (1.2)$$

gdje su F_{max} , L , b i h isto kao kod računanja modula elastičnosti.

Slika 4.3 prikazuje ispitivanje savojne čvrstoće pod kutevima 0° , 45° i 90° .



Slika 4.3 Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile, [21]

4.3 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća je najveće naprezanje koje se javlja na uzorku smještenom na horizontalnoj podlozi kad na njega djeluje sila i nastoji ga stlačiti. Moramo razlikovati čvrstoću u smjeru vlakanaca i čvrstoću okomitu na smjer vlakanaca jer se one jako razlikuju. Tlačna čvrstoća u smjeru vlakanaca je 3-10 puta veća od tlačne čvrstoće okomite na smjer vlakanaca. Prilikom tlačnog opterećenja može doći do izvijanja, ali kod nekih vrsta drva nam kao upozorenje prije izvijanja dolazi do pucanja, stoga možemo spriječiti kako ne bi došlo do izvijanja. Slika 4.4 prikazuje shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće.



Slika 4.4 Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće, [21]

Tlačna čvrstoća računa se prema izrazu (1.3) :

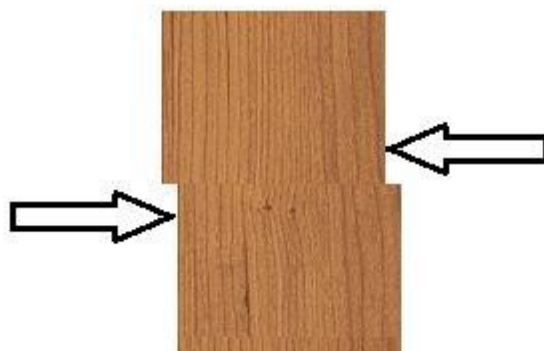
$$\sigma_{pm} = \frac{F_{pm}}{A_0} \text{ (MPa)} \quad (1.3)$$

F_{pm} - maksimalna sila loma (N)

A_0 - površina presjeka na mjestu loma (mm²)

4.4 Smična čvrstoća

Smično naprezanje javlja se kao rezultat paralelnog djelovanja dviju suprotnih sila. Te sile određuju ravninu smicanja. Površina smicanja može biti uzdužna, poprečna i dijagonalna. Kod poprečne površine sile smicajnja mogu biti paralelne s godovima ili okomite na njih, dok kod uzdužne površine mogu biti u smjeru vlakancu ili okomite na njih. Smicajna čvrstoća okomito na vlakanca kod frontalne ravnine smicanja znatno je veća od smicajne čvrstoće u smjeru vlakancu. Slika 4.5 daje shematski prikaz ispitivanja smične čvrstoće.



Slika 4.5 Shematski prikaz ispitivanja smične čvrstoće, [21]

Smična čvrstoća računa se prema izrazu (1.4) :

$$R_{m\tau} = \frac{F_{\max}}{b \cdot l}, \text{ N/mm}^2 \quad (1.4)$$

gdje su:

F_{\max} - maksimalna sila u N,

b, l – dimenzije smicajne površine u mm.

4.5 Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća se definira kao omjer maksimalne postignute sile pri vlačnom opterećenju i početnog presjeka ispitnog uzorka. Čvrstoća na vlak kod drva se razlikuje ovisno o djelovanju sile pa može biti paralelna i okomito na vlakanca. Čvrstoća na vlak znatno se smanjuje uslijed pogrešaka u građi drva.

Vlačna čvrstoća računa se prema izrazu (1.5) :

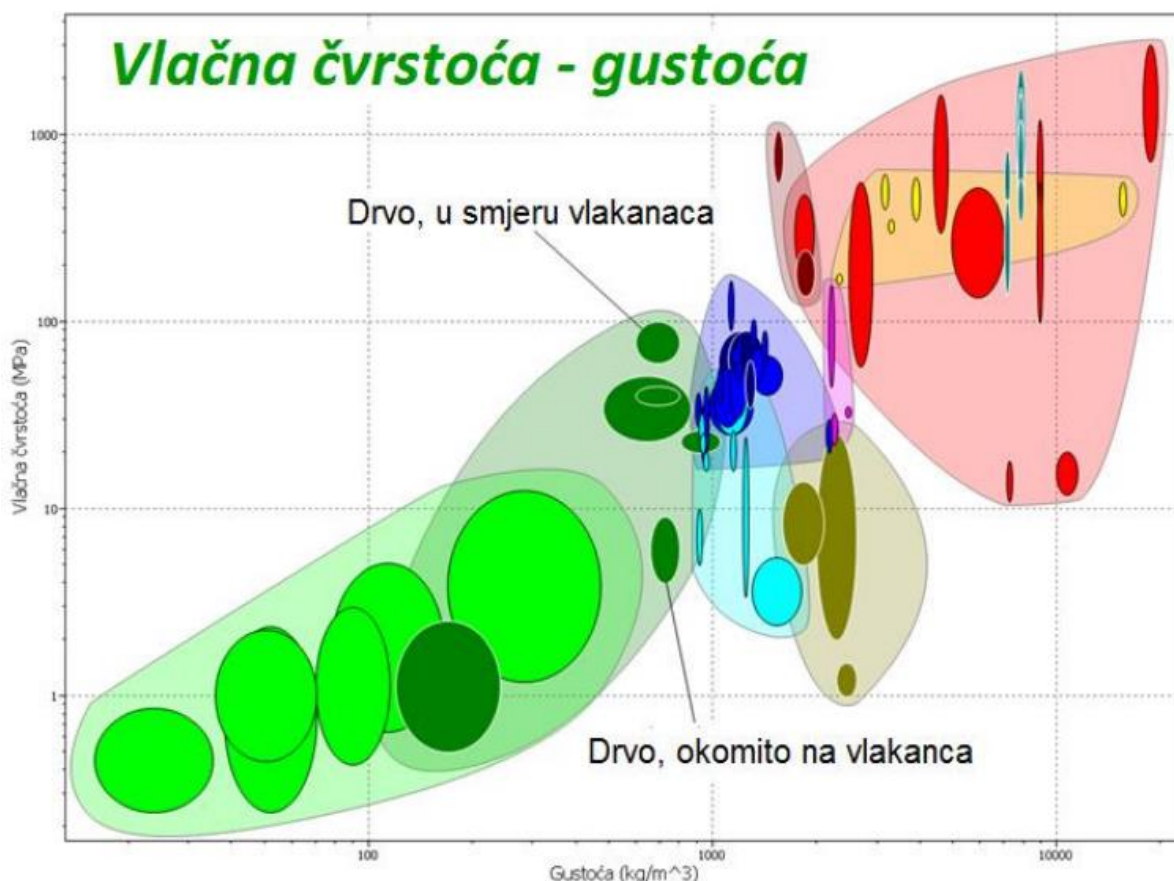
$$R_m = \frac{F_{\max}}{A}, \text{ N/mm}^2 \quad (1.5)$$

gdje su:

F_{\max} - maksimalna sila u N,

A – dimenzije početne površine u mm².

Slika 4.6 prikazuje vrijednosti drva i drugih tehničkih materijala s obzirom na njihov odnos vlačne čvrstoće i gustoće.



Slika 4.6 Odnos vlačne čvrstoće i gustoće za drvo i druge tehničke materijale, [21]

4.6 Žilavost

Žilavost ili udarni rad loma ispituje se na Charpyjevom batu i ono određuje ponašanje materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Charpyjev bat prikazan je na Slika 4.7. Znatno se razlikuju vrijednosti žilavosti s obzirom na smjer glavne osi. Najveću žilavost ćemo imati u radialnom smjeru, dok ćemo najmanju imati u longitudinalnom smjeru. Slika 4.8 prikazuje vrijednosti drva i drugih tehničkih materijala s obzirom na njihov odnos čvrstoće i žilavosti.

Žilavost se računa prema izrazu (1.6) :

$$KU(KV) = G(h_1 - h_2) , J \quad (1.6)$$

gdje su:

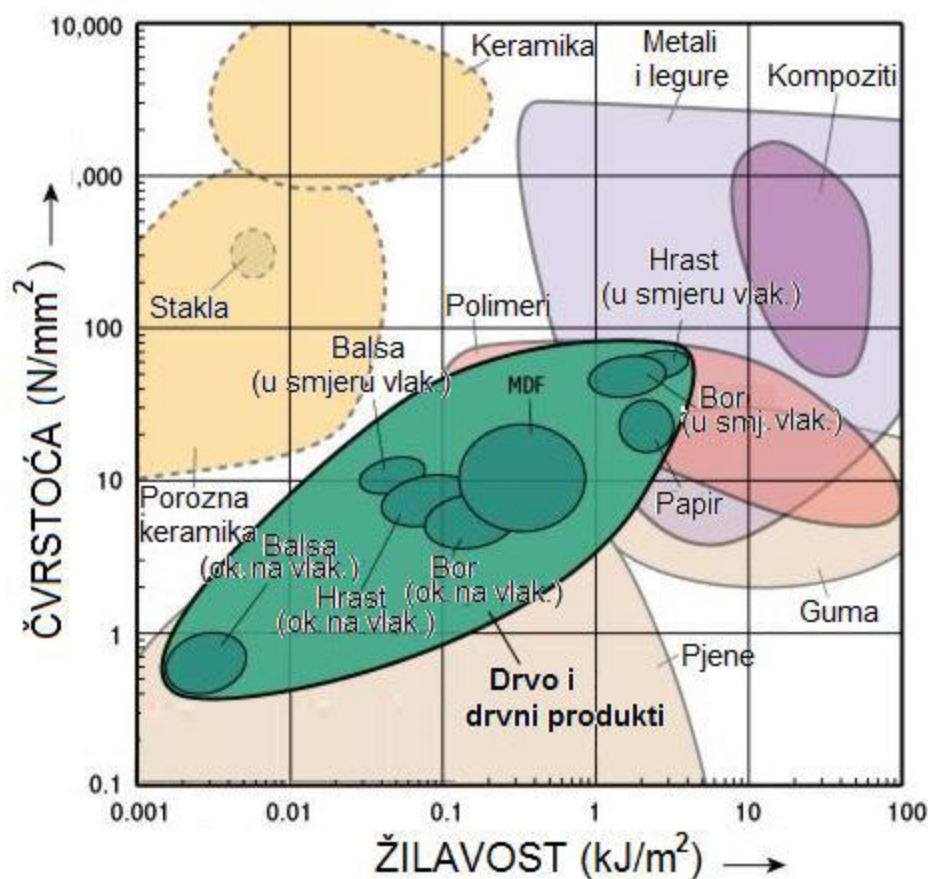
G – težina bata u N

h_1 – početna visina bata u m

h_2 – visina bata nakon loma epruvete u m



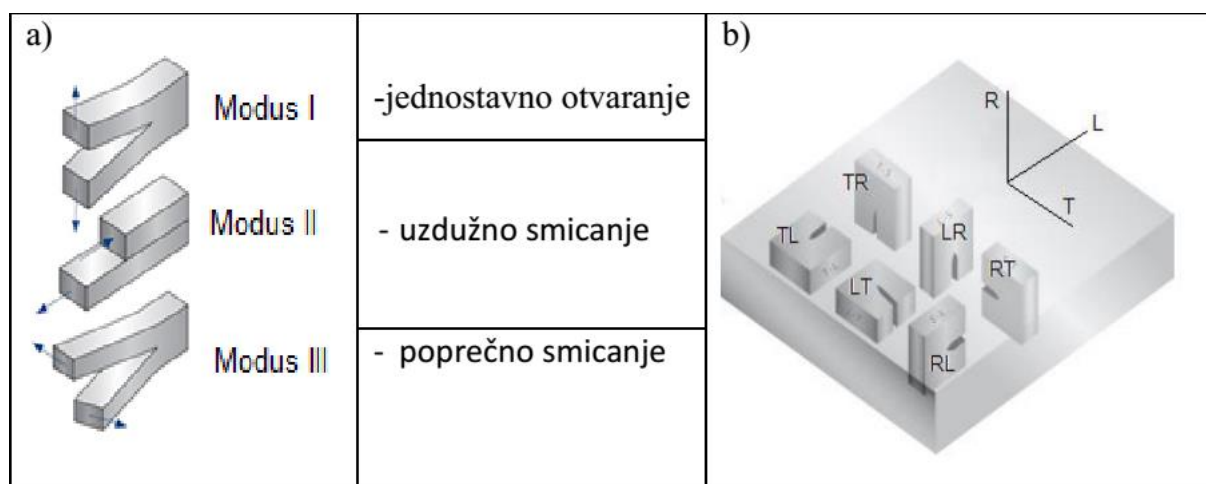
Slika 4.7 Charpy-ev bat, uređaj za ispitivanje žilavosti, [22]



Slika 4.8 Odnos čvrstoće i žilavosti za drvo i druge tehničke materijale, [21]

4.7 Lomna žilavost

Lomna žilavost je kritična veličina faktora intenzivnosti naprezanja na vrhu već postojeće pukotine, koja izaziva daljnje širenje te iste pukotine. Prema vrijednosti lomne žilavosti možemo odrediti sigurnost neke konstrukcije od pojave loma ili puknuća. Postoje tri osnovna načina otvaranja pukotine prema Irwinu (I, II i III) i šest mogućih sustava otvaranja pukotine u drvu (RT, TR, LT, TL, RL, LR), prikazanih na Slika 4.9.



Slika 4.9 Tri osnovna načina otvaranja pukotine prema Irwinu (a) i šest mogućih sustava otvaranja pukotine u drvu (b), [12]

4.8 Tvrdoća

Tvrdoća drva predstavlja otpor ulaska nekog drugog tijela u drvo. Tvrdoća se može odrediti u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku. Tvrdoća drva se najčešće mjeri metodom po Janki, koju prikazuje Slika 4.10 ili po Brinellu koju prikazuje Slika 4.11 Slika 4.10.

Metodom po Janki, tvrdoća se određuje na uzorcima dimenzija 50 x 50 x 30 mm. Mjeri se sila koja je potrebna da se čelična kuglica utisne u drvo do polovice svojeg promjera od 5,642 mm. Brzina utiskivanja je konstantna i ne prelazi 0,1 mm/s.

Tvrdoća po Janki računa se prema izrazu (1.7) :

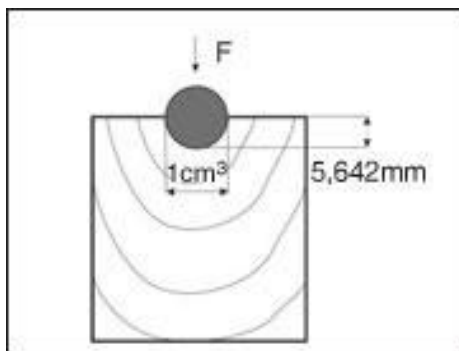
$$H_j = K \cdot F, [\text{N}] \quad (1.7)$$

gdje je:

H_j – tvrdoća po Janki u N

K – koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice

F – sila utiskivanja u N.

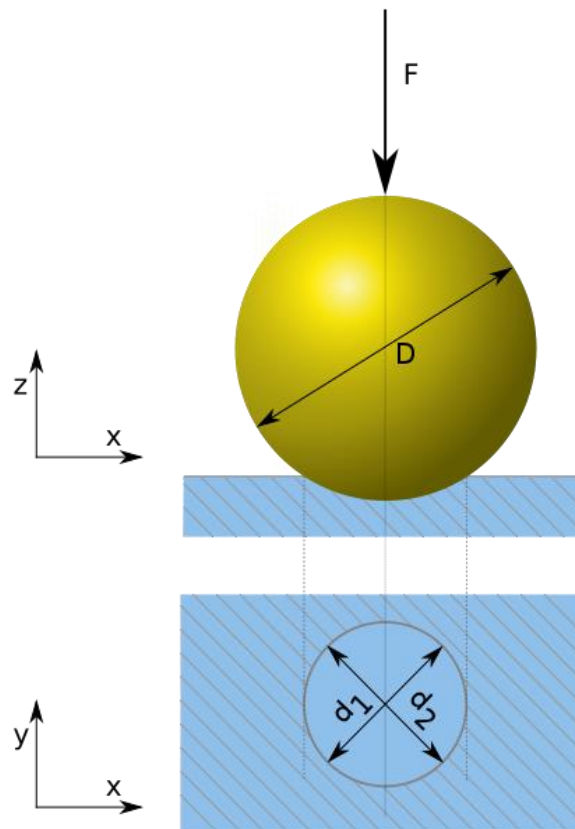


Slika 4.10 Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Jankovom metodom, [14]

Metoda po Brinellu se zasniva na utiskivanju čelične kuglice u drvo silom od 500 ili 1000N. Između kuglice i površine drva stavlja se indigo papir da se otisak bolje vidi i da se preciznije očita promjer otiska. Jedina mana metode po Brinellu je ta što nije dobra za jako tvrda drva. Tvrdoća drva uglavnom ovisi o vrsti drva, gustoći i udjelu vlage u drvu. Razlike među vrstama su dosta velike, ali i unutar iste vrste moguća su poprilična rasipanja.

Tvrdoća po Brinellu računa se prema izrazu (1.8) :

$$H_b = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.8)$$



Slika 4.11 Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom, [15]

5. HRAST LUŽNJAK

Hrast lužnjak botaničkog roda *Quercus robur* L je listopadno stablo iz porodice bukva (*Fagaceae*). Naraste do 50 metara u visinu, a deblo je promjera do 3 metra. Korijen sustav je jako dobro razvijen, a krošnja je široka, vrlo dobra razgranata i nepravilna. Kora je u mladosti glatka, a kasnije uzdužno ispuca i postane debela. Pupoljci su jajasto okruglasti, malo tupi, gusti na vrhu izboja, prekriveni svijetlosmeđim spiralnim ljuskicama. Listovi su tamnozeleni, obrnuto jajasti, čvrsti, dugi su 8-20 cm, a široki 3-10 cm. Cvjetovi su žutozeleni, a cvatu u travnju i svibnju. Plod je svijetlosmeđi žir 2-5 cm duljine, kojeg prikazuje Slika 5.2. U kolovozu mnoge nedozrele žireve možemo naći na podu, a oni na stablu dozrijevaju u rujnu i listopadu. Rasprostranje po gotovo cijeloj Europi, a nalazi se jos na području Kavkaza i Male Azije. Odgovaraju mu duboka i vlažna tla. Otporan na sušu, visoke temperature, gradska onečišćenja i vjetar. Kod nas često rastu u Slavojini i Posavini. Razmnožava se sjemenom i vegetativno. Pojedina stabla mogu živjeti i do 1500 godina. Slika 5.1 prikazuje hrast lužnjak.



Slika 5.1 Hrast lužnjak, [1]



Slika 5.2 **Plod hrasta lužnjaka, [1]**

6. EKSPERIMENTALNA METODA

Drugi dio rada je eksperimentalni u kojem provodimo ispitivanje savojne čvrstoće naših uzoraka. Uzorci su izrezani iz hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru. Eksperimentalni dio se sastoji od pripreme, samog ispitivanja, obrade rezultata i donošenja zaključka.

6.1 Priprema uzorka

Iz velikog komada hrasta lužnjaka za ispitivanje su izrezani uzorci kvadratnog oblika. Svi uzorci su izrezani iz longitudinalnog smjera. Smjerovi godova uzoraka u odnosu na smjer savojne sile su zakrenuti za : 0° , 45° i 90° . Za svaki smjer je ispitano po 25 uzoraka. Nakon rezanja, uzorci su postupkom brušenja dovedeni do željenih dimenzija. Prvi, grublji postupak brušenja je odrađen na stroju namijenjenom za brušenje materijala pri čemu je korišten brusni papir granulacije P 80. Nakon postizanja željenih dimenzija epruveta, korišten je brusni papir granulacije P 800 kako bi finijim postupkom brušenja pripremili epruvete za ispitivanje na kidalici. Na Slika 6.1 je uređaj na kojem je napravljen prvi, grublji dio brušenja kako bi uzorak doveli do željenih dimenzija.



Slika 6.1 Uređaj namijenjen za brušenje materijala

Grublji postupak brušenja odrađen je sa brusnim papirom granulacije P80, te nam je za taj postupak trebalo više vremena zbog namještavnja dimenzija epruveta.



Slika 6.2 Brusni papir oznake P 800

Finijim postupkom epruvete su obrađene tako da imaju glatku i ravnu površinu kako bi bili bolji rezultati prilikom samog ispitivanja loma epruveta. Na slikama 6.2 i 6.3 prikazani su brusni papiri koji su korišteni za postizanje željenih dimenzija i ravne površine.



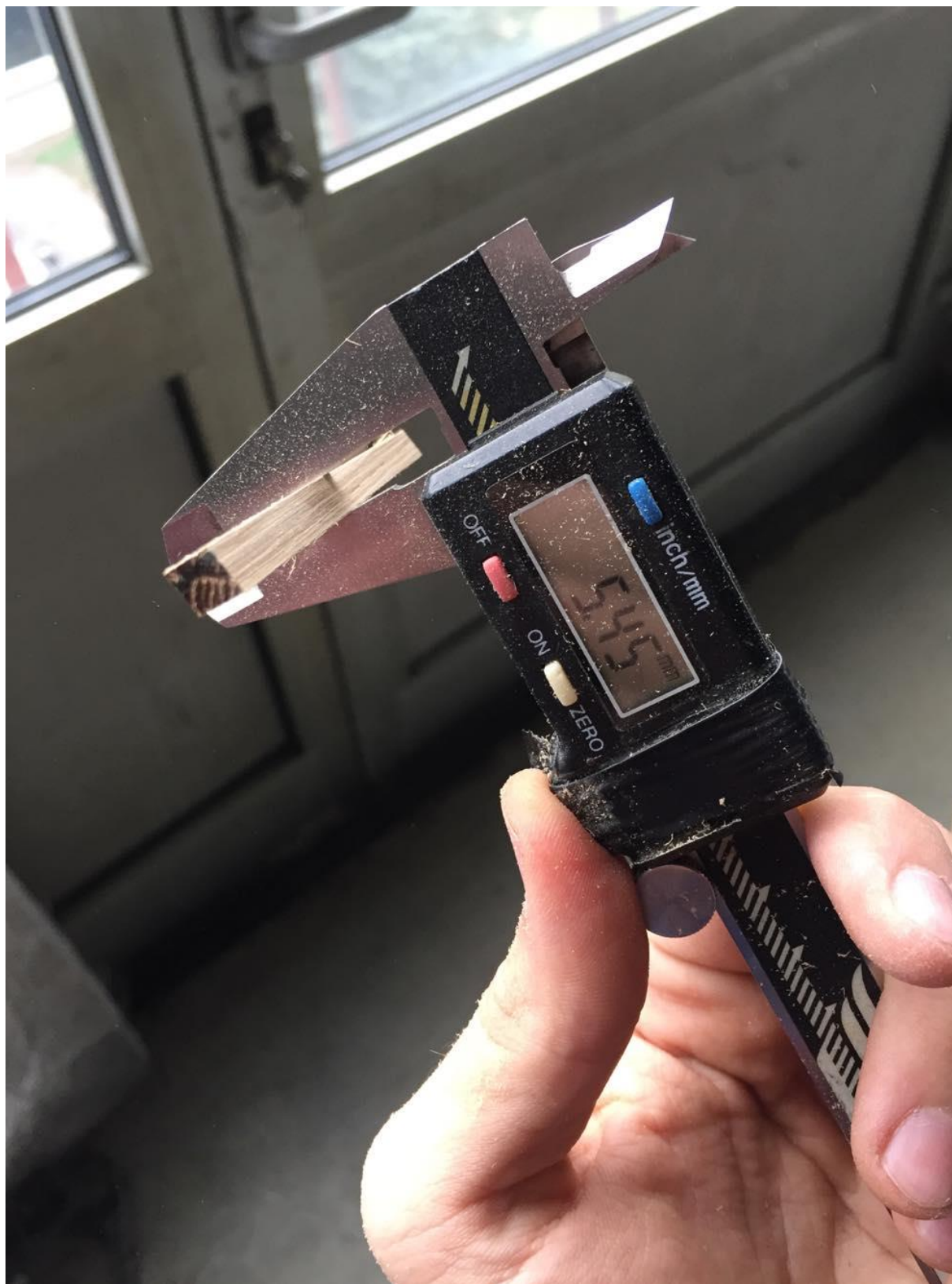
Slika 6.3 Brusni papir oznake P 80

Kako bi razlikovali epruvete prema smjeru goda, morali smo uvesti neke oznake. Koristili smo se slovima A, B i C, te brojevima 1-28. Slova su nam označavala smjer goda, dok su brojevi bili oznaka količine epruveta. Slovo A je bila oznaka za epruvete koje su imale paralelni smjer godova (0°) u odnosu na silu koja je djelovala na epruvete. Slovo B je bila oznaka za epruvete koje su imale okomiti smjer godova (90°) u odnosu na silu koja je djelovala na epruvete. Slovo C je bila oznaka za epruvete kod kojih je smjer sile u odnosu na tijek godova bio pod kutem od 45° . Slika 6.4 prikazuje grupirane epruvete s obzirom na tijek godova.



Slika 6.4 Raspored epruveta s obzirom na tijek godova

Zadnji dio pripreme epruveta je bilo mjerenje njihovih dimenzija. Digitalnim pomoćnim mjerilom, koje prikazuje Slika 6.5, je svakoj epruveti izmjerena njena visina (a) i širina (b). Mjerenje se provodi na sredini epruvete jer na tom mjestu djeluje i savojna sila. Dimenzije epruveta trebaju biti približno $6 \times 6 \times 86 \text{ mm}$. U Tablica 2 nalaze se vrijednosti dimenzija svih epruveta za ispitivanje, a na Slika 6.6 prikazane su sve epruvete sa pripadajućom oznakom.



Slika 6.5 Pomoćno mjerilo kojim smo mjerili dimenzije epruveta

Tablica 2 Vrijednosti dimenzija svih epruveta za ispitivanje

| Epruvete | | | | | | |
|----------|----------|------|-----------|------|-----------|------|
| | A (0°) | | B (90°) | | C (45°) | |
| | A | B | a | b | A | b |
| 1 | 5,23 | 5,44 | 5,57 | 5,49 | 6,15 | 5,96 |
| 2 | 5,64 | 5,49 | 5,86 | 5,55 | 5,95 | 5,90 |
| 3 | 5,87 | 5,96 | 5,82 | 5,81 | 5,93 | 5,78 |
| 4 | 5,89 | 5,61 | 5,44 | 5,87 | 5,97 | 5,51 |
| 5 | 5,14 | 5,69 | 5,80 | 5,63 | 5,77 | 6,12 |
| 6 | 5,27 | 5,97 | 5,82 | 5,89 | 5,93 | 5,57 |
| 7 | 5,39 | 5,44 | 5,57 | 5,96 | 6,01 | 5,88 |
| 8 | 5,73 | 5,93 | 5,58 | 5,87 | 5,77 | 5,92 |
| 9 | 5,58 | 5,85 | 5,90 | 5,50 | 5,53 | 5,78 |
| 10 | 5,21 | 5,66 | 5,99 | 5,61 | 5,65 | 5,80 |
| 11 | 5,72 | 5,71 | 5,61 | 5,24 | 5,96 | 5,90 |
| 12 | 5,57 | 5,98 | 5,61 | 5,74 | 5,66 | 5,74 |
| 13 | 5,91 | 5,47 | 6,14 | 5,76 | 5,81 | 5,72 |
| 14 | 5,60 | 5,93 | 5,80 | 5,96 | 5,74 | 5,53 |
| 15 | 5,36 | 5,87 | 6,06 | 5,93 | 6,00 | 5,71 |
| 16 | 5,87 | 6,28 | 5,87 | 5,33 | 6,02 | 6,00 |
| 17 | 5,77 | 5,97 | 5,96 | 5,87 | 5,74 | 6,02 |
| 18 | 5,54 | 5,89 | 5,41 | 5,29 | 6,11 | 6,10 |
| 19 | 5,69 | 5,77 | 5,59 | 5,90 | 5,88 | 6,09 |
| 20 | 5,88 | 5,93 | 5,53 | 5,73 | 5,76 | 5,73 |
| 21 | 5,74 | 5,97 | 5,72 | 5,55 | 6,04 | 5,96 |
| 22 | 5,48 | 5,64 | 5,35 | 5,12 | 5,60 | 5,48 |
| 23 | 5,41 | 5,82 | 5,48 | 5,59 | 6,04 | 6,03 |
| 24 | 5,80 | 5,47 | 5,52 | 5,67 | 6,03 | 5,97 |
| 25 | | | | | 5,92 | 5,75 |
| 26 | | | | | 5,46 | 5,37 |
| 27 | | | | | 5,45 | 5,86 |
| 28 | | | | | 5,67 | 5,37 |



Slika 6.6 Oznaka i mjerenje dimenzija epruveta

6.2 Ispitivanje savojne čvrstoće

Ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je na uzorcima dimenzija 6x6x80 mm metodom savijanja u tri točke na kidalici Messphysik BETA 50-5. Ispitivanja su se vršila u tri grupe. Uzorci su opterećivani do loma. Prije samog ispitivanja izmjerene su dimenzije poprečnog presjeka uzorka, a tijekom ispitivanja bilježila se savojna sila i progib ispitnog uzorka. Razmak između oslonaca bio je 74 mm. Promjer valjka kojim je opterećivana ispitna proba bio je 10 mm. Progib drvene grede mjereno je pomoću video ekstenzometra (ME 46, Messphysik) te je korišteno opterećenje od 6,3 kN i konstantna brzina opterećenja od 2,8 mm/min. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Temperatura okoline za vrijeme mjerenja bila je 22°C, a relativna vlažnost zraka 48 %. Na Sliku 6.7 prikazana je kidalica na kojoj je provedeno ispitivanje, a u tablici 3 nalaze se ispitivane veličine uz pripadajuću oznaku i mjernu veličinu.



Slika 6.7 **Kidalica Messphysik BETA 50-5**

Tablica 3 Oznake veličina i mjernih veličina

| Oznaka veličine | Naziv veličine | Mjerna jedinica |
|-----------------|---------------------------|-----------------|
| Test No | Redni broj ispitivanja | - |
| BNO | Serijski broj ispitivanja | - |
| Fmax | Maksimalna sila | N |
| σ_f | Svojna čvrstoća | MPa |
| Smax | Maksimalni progib grede | mm |
| Ef | Modul elastičnosti | GPa |
| dFM | Prosječni progib grede | mm |
| ϵ_f | Istezljivost | % |
| Mean | Aritmetička sredina | - |
| Std.dev. | Standardno odstupanje | - |

6.3 Ispitivanje prve serije uzoraka sa svojom silom koja je paralelna s godovima

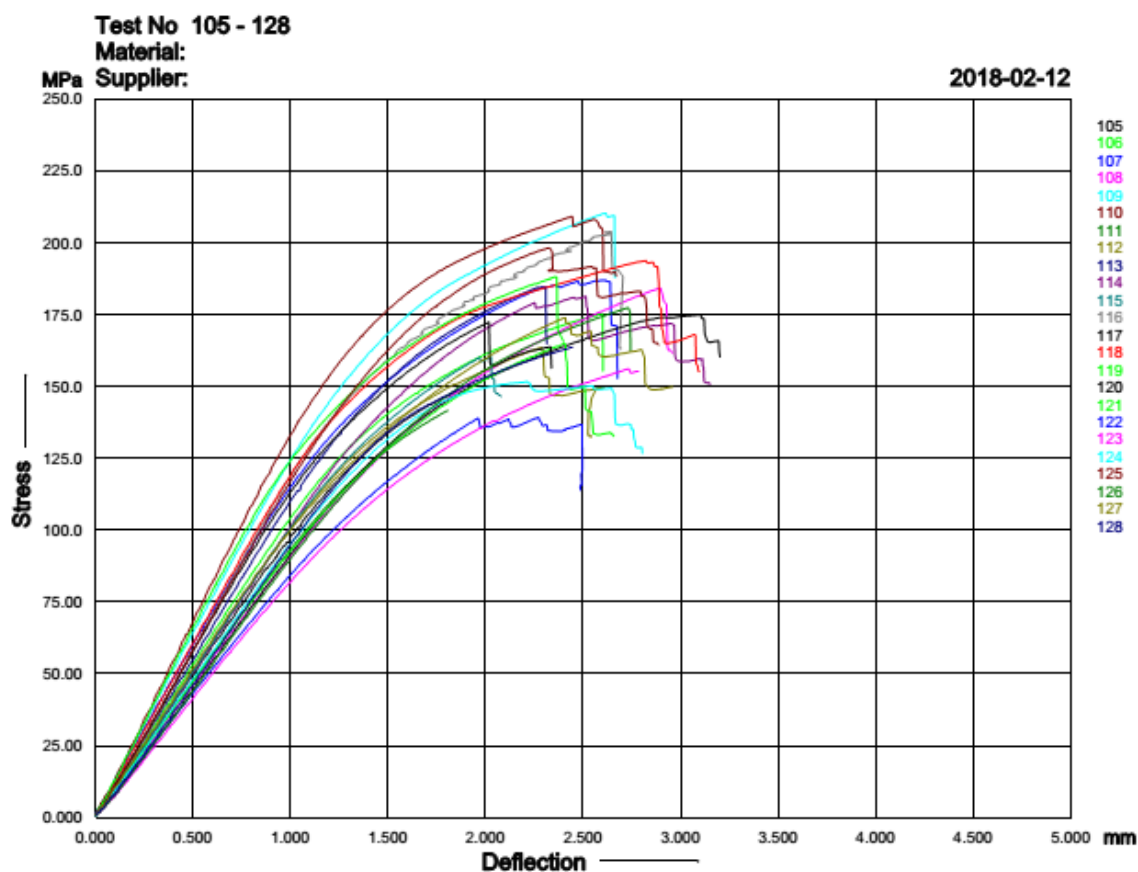
Kut između smjera sile i tijeka godova je 0° . Oznaka ove skupine je A. Uzorci su postavljeni na sredinu kidalice. Opterećeni su do pojave loma. Naizmjeničnim micanjem i postavljanjem novih epruveta nakon pojave loma dobiveni su rezultati prikazani u .

Tablica 4.

Tablica 4 Rezultati ispitivanja epruveta skupine A

| Test No | BNo | Fmax N | σ_f M MPa | smax mm | Ef GPa | dFM mm | ϵ_{tf} M % |
|-----------|-----|-----------|---------------------|------------|-----------|-----------|------------------------|
| 105 | A1 | 199.2 | 148.6 | 2.023 | 17.17 | 1.860 | 1.160 |
| 106 | A2 | 276.0 | 175.4 | 2.856 | 17.37 | 2.591 | 1.765 |
| 107 | A3 | 346.1 | 187.1 | 2.936 | 18.26 | 2.601 | 1.889 |
| 108 | A4 | 323.2 | 184.3 | 3.287 | 14.40 | 2.896 | 2.121 |
| 109 | A5 | 284.9 | 210.4 | 2.963 | 22.53 | 2.613 | 1.668 |
| 110 | A6 | 312.4 | 209.2 | 2.728 | 23.91 | 2.437 | 1.575 |
| 111 | A7 | 201.7 | 141.7 | 1.951 | 16.11 | 1.807 | 1.152 |
| 112 | A8 | 287.1 | 163.7 | 2.557 | 16.43 | 2.286 | 1.606 |
| 113 | A9 | 303.1 | 184.7 | 2.533 | 18.20 | 2.289 | 1.549 |
| 114 | A10 | 251.2 | 181.5 | 2.802 | 18.11 | 2.514 | 1.600 |
| 115 | A11 | 270.1 | 160.5 | 2.257 | 16.66 | 2.028 | 1.414 |
| 116 | A12 | 341.0 | 204.0 | 3.118 | 20.26 | 2.644 | 1.903 |
| 117 | A13 | 301.3 | 175.0 | 3.543 | 14.65 | 3.091 | 2.294 |
| 118 | A14 | 324.7 | 193.8 | 3.199 | 19.85 | 2.819 | 1.963 |
| 119 | A15 | 250.7 | 165.0 | 2.655 | 16.06 | 2.397 | 1.559 |
| 120 | A16 | 336.4 | 172.5 | 2.301 | 18.41 | 2.017 | 1.480 |
| 121 | A17 | 337.2 | 188.3 | 2.694 | 20.97 | 2.357 | 1.703 |
| 122 | A18 | 226.9 | 139.3 | 2.485 | 14.13 | 2.269 | 1.509 |
| 123 | A19 | 263.0 | 156.2 | 3.030 | 13.69 | 2.735 | 1.889 |
| 124 | A20 | 280.4 | 151.8 | 2.524 | 15.12 | 2.211 | 1.626 |
| 125 | A21 | 351.5 | 198.3 | 2.568 | 19.05 | 2.321 | 1.615 |
| 126 | A22 | 270.8 | 177.5 | 3.112 | 15.40 | 2.729 | 1.869 |
| 127 | A23 | 267.0 | 174.0 | 2.562 | 17.54 | 2.409 | 1.519 |
| 128 | A24 | 271.5 | 163.8 | 2.703 | 15.29 | 2.444 | 1.718 |
| Mean: | | 286.6 | 175.3 | 2.724 | 17.48 | 2.432 | 1.673 |
| Std.dev.: | | 42.98 | 20.06 | 0.387 | 2.644 | 0.317 | 0.265 |

Na Slika 6.8 prikazani su dijagrami naprezanje – progib za sve epruvete



Slika 6.8 Dijagram naprezanja – progib za epruvete skupine A

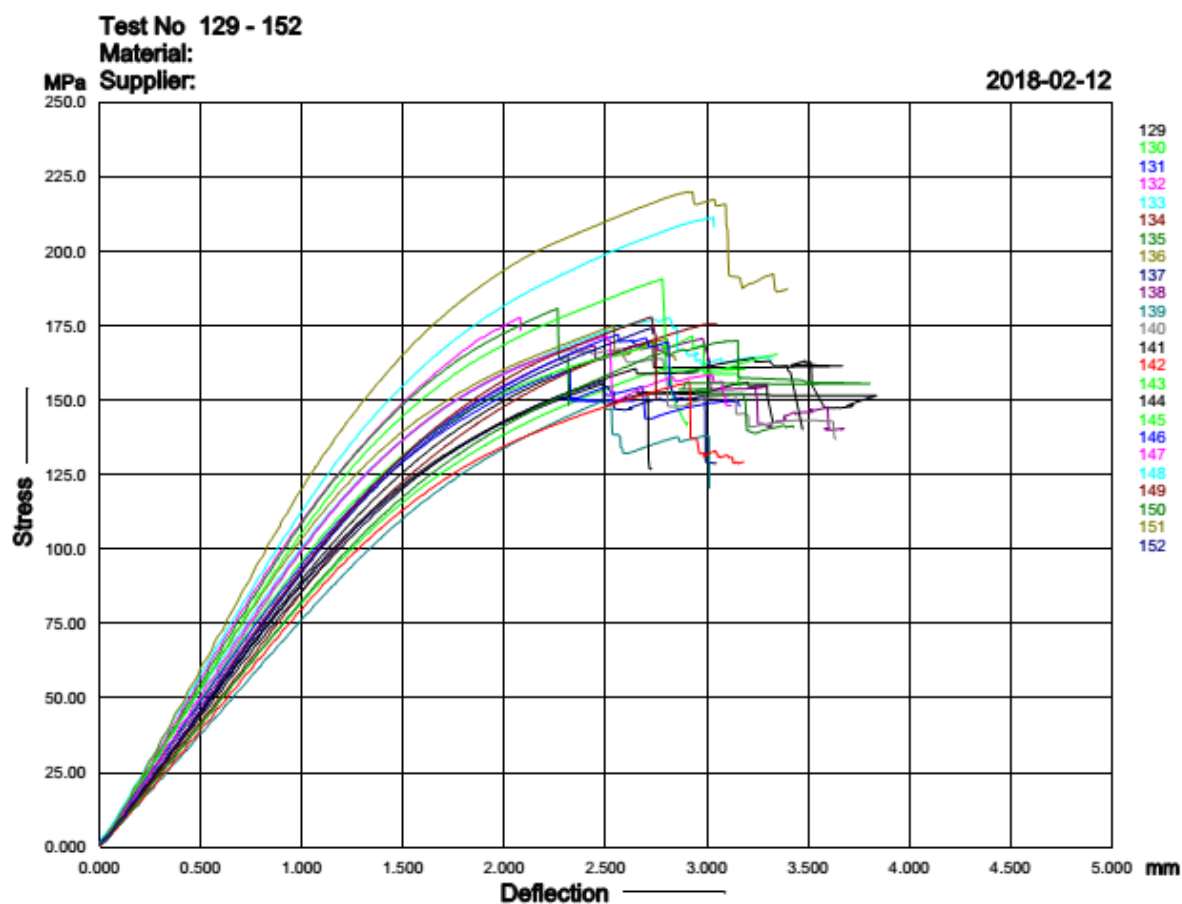
6.4 Ispitivanje druge serije uzoraka sa savojnom silom koja je okomita na godove

Kut između smjera sile i tijeka godova je 90° . Oznaka ove skupine je B. Uzorci su postavljeni na oslonce, a savojna sila je djelovala na sredini. Opterećeni su do pojave loma. Naizmjeničnim micanjem i postavljanjem novih epruveta nakon pojave loma dobiveni su rezultati prikazani u Tablica 5 Rezultat ispitivanja epruveta skupine B Tablica 5.

Tablica 5 Rezultat ispitivanja epruveta skupine B

| Test No | BNo | Fmax N | $\sigma_f M$ MPa | smax mm | Ef GPa | dFM mm | $\epsilon_{tf} M$ % |
|-----------|-----|-----------|---------------------|------------|-----------|-----------|------------------------|
| 129 | B1 | 260.7 | 169.9 | 3.116 | 14.96 | 2.729 | 1.902 |
| 130 | B2 | 277.6 | 161.4 | 3.173 | 12.83 | 2.818 | 2.038 |
| 131 | B3 | 283.7 | 160.0 | 2.789 | 15.07 | 2.323 | 1.778 |
| 132 | B4 | 278.3 | 177.8 | 2.335 | 19.38 | 2.075 | 1.392 |
| 133 | B5 | 303.2 | 177.7 | 3.388 | 16.16 | 2.817 | 2.153 |
| 134 | B6 | 315.8 | 175.7 | 3.453 | 13.38 | 3.047 | 2.202 |
| 135 | B7 | 301.4 | 180.9 | 2.614 | 18.48 | 2.262 | 1.596 |
| 136 | B8 | 288.1 | 175.0 | 2.978 | 17.67 | 2.541 | 1.821 |
| 137 | B9 | 269.9 | 156.5 | 2.860 | 14.05 | 2.489 | 1.849 |
| 138 | B10 | 309.8 | 170.8 | 3.390 | 14.44 | 2.978 | 2.225 |
| 139 | B11 | 223.0 | 150.1 | 2.855 | 12.49 | 2.491 | 1.755 |
| 140 | B12 | 272.6 | 167.5 | 2.734 | 16.34 | 2.354 | 1.680 |
| 141 | B13 | 304.3 | 155.6 | 2.868 | 13.62 | 2.487 | 1.929 |
| 142 | B14 | 282.3 | 156.3 | 3.457 | 12.85 | 2.913 | 2.197 |
| 143 | B15 | 374.5 | 190.9 | 3.335 | 16.28 | 2.780 | 2.214 |
| 144 | B16 | 271.8 | 164.3 | 3.362 | 13.66 | 3.232 | 2.162 |
| 145 | B17 | 317.6 | 169.1 | 3.285 | 14.95 | 2.769 | 2.145 |
| 146 | B18 | 240.2 | 172.2 | 2.940 | 16.22 | 2.559 | 1.743 |
| 147 | B19 | 285.2 | 171.7 | 3.006 | 16.96 | 2.503 | 1.841 |
| 148 | B20 | 334.0 | 211.6 | 3.533 | 19.00 | 3.031 | 2.141 |
| 149 | B21 | 291.2 | 178.0 | 3.085 | 15.48 | 2.726 | 1.933 |
| 150 | B22 | 224.7 | 170.2 | 3.534 | 14.37 | 3.144 | 2.072 |
| 151 | B23 | 333.0 | 220.2 | 3.448 | 20.77 | 2.907 | 2.070 |
| 152 | B24 | 271.5 | 174.4 | 3.128 | 15.58 | 2.729 | 1.892 |
| Mean: | | 288.1 | 173.2 | 3.111 | 15.62 | 2.696 | 1.947 |
| Std.dev.: | | 34.30 | 16.17 | 0.320 | 2.213 | 0.293 | 0.222 |

Na Slika 6.9 prikazani su dijagrami naprežanje – progib za sve epruvete



Slika 6.9 Dijagram naprezanje – progib za epruvete skupine B

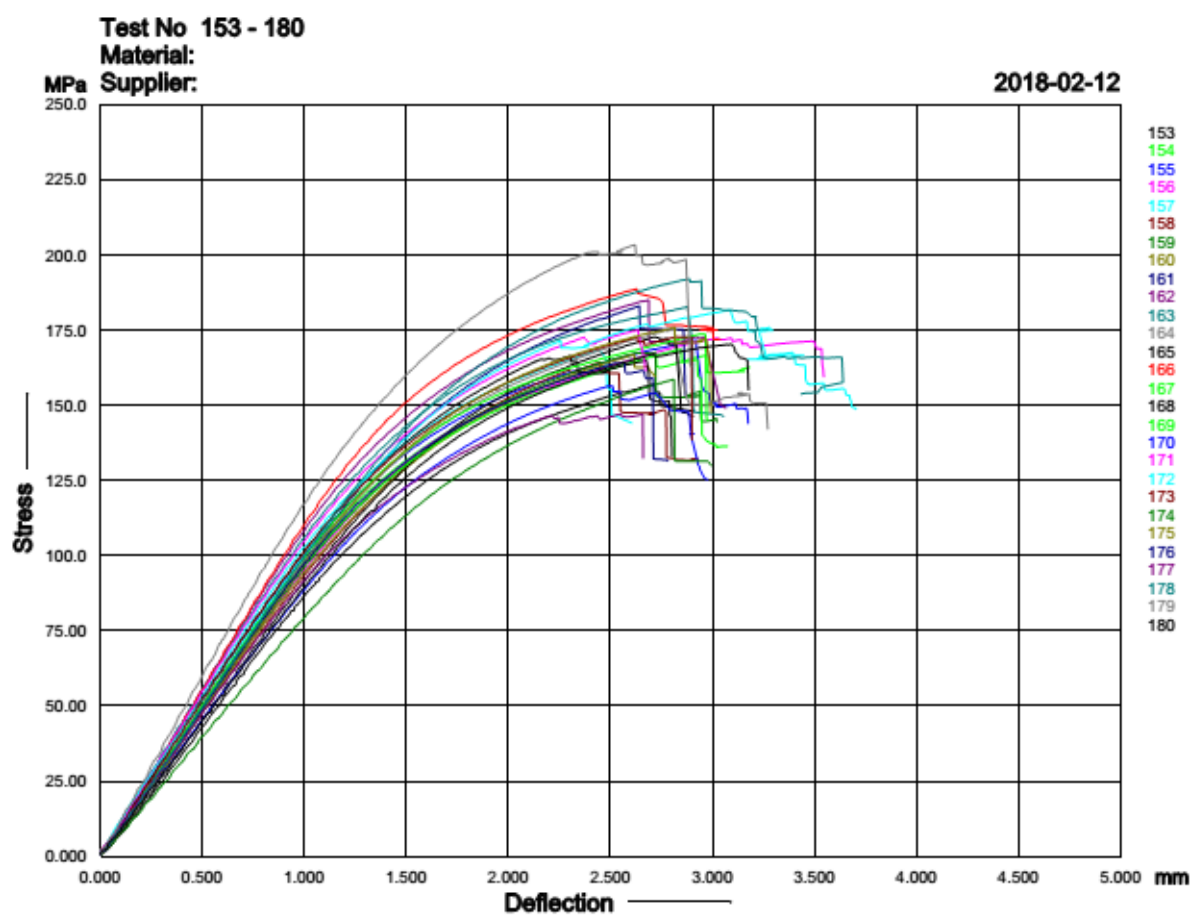
6.5 Ispitivanje treće serije uzoraka sa savojnom silom koja je pod kutem od 45° u odnosu na tijek godova

Kut između smjera sile i tijeka godova je 45° . Oznaka ove skupine je C. Uzorci su postavljeni na oslonce i opterećeni savojnom silom. Opterećeni su do pojave loma. Naizmjeničnim micanjem i postavljanjem novih epruveta nakon pojave loma dobiveni su rezultati prikazani u Tablica 6.

Tablica 6 Rezultati ispitivanja epruveta skupine C

| Test No | BNo | Fmax N | σ_f M MPa | smax mm | Ef GPa | dFM mm | ε_{tf} M % |
|-----------|-----|-----------|---------------------|------------|-----------|-----------|---------------------------|
| 153 | C1 | 319.1 | 157.1 | 3.129 | 13.45 | 2.708 | 2.109 |
| 154 | C2 | 315.7 | 167.8 | 3.106 | 15.87 | 2.722 | 2.025 |
| 155 | C3 | 314.5 | 171.7 | 3.292 | 15.86 | 2.919 | 2.139 |
| 156 | C4 | 305.1 | 172.4 | 3.525 | 14.95 | 3.093 | 2.306 |
| 157 | C5 | 309.3 | 168.5 | 2.841 | 16.98 | 2.444 | 1.796 |
| 158 | C6 | 290.1 | 164.4 | 2.695 | 14.69 | 2.448 | 1.751 |
| 159 | C7 | 320.8 | 167.6 | 2.998 | 15.13 | 2.626 | 1.974 |
| 160 | C8 | 296.3 | 166.9 | 2.955 | 15.59 | 2.616 | 1.868 |
| 161 | C9 | 291.8 | 183.3 | 3.002 | 16.58 | 2.642 | 1.819 |
| 162 | C10 | 308.9 | 185.2 | 3.063 | 18.20 | 2.681 | 1.896 |
| 163 | C11 | 344.2 | 182.9 | 3.291 | 16.69 | 2.877 | 2.146 |
| 164 | C12 | 291.5 | 176.0 | 3.159 | 16.10 | 2.813 | 1.959 |
| 165 | C13 | 300.8 | 172.9 | 3.089 | 14.93 | 2.722 | 1.967 |
| 166 | C14 | 309.8 | 188.8 | 2.927 | 18.26 | 2.626 | 1.841 |
| 167 | C15 | 312.4 | 168.7 | 3.218 | 15.36 | 2.846 | 2.116 |
| 168 | C16 | 326.1 | 166.4 | 2.571 | 15.90 | 2.297 | 1.696 |
| 169 | C17 | 310.5 | 173.8 | 3.410 | 16.38 | 2.943 | 2.145 |
| 170 | C18 | 321.3 | 156.6 | 2.952 | 13.48 | 2.498 | 1.976 |
| 171 | C19 | 332.4 | 175.2 | 3.035 | 16.82 | 2.635 | 1.956 |
| 172 | C20 | 311.2 | 181.7 | 3.380 | 15.60 | 3.081 | 2.133 |
| 173 | C21 | 338.8 | 173.0 | 3.190 | 15.89 | 2.826 | 2.111 |
| 174 | C22 | 245.7 | 158.7 | 3.298 | 13.23 | 2.811 | 2.024 |
| 175 | C23 | 348.9 | 176.0 | 3.259 | 15.18 | 2.810 | 2.157 |
| 176 | C24 | 321.3 | 164.3 | 2.849 | 15.30 | 2.560 | 1.882 |
| 177 | C25 | 267.3 | 147.3 | 2.845 | 14.50 | 2.552 | 1.845 |
| 178 | C26 | 277.1 | 192.1 | 3.113 | 17.03 | 2.885 | 1.862 |
| 179 | C27 | 318.9 | 203.4 | 2.847 | 20.30 | 2.609 | 1.700 |
| 180 | C28 | 265.0 | 170.4 | 3.339 | 14.58 | 3.067 | 2.074 |
| Mean: | | 307.7 | 172.6 | 3.085 | 15.82 | 2.727 | 1.974 |
| Std.dev.: | | 23.69 | 11.72 | 0.225 | 1.523 | 0.199 | 0.156 |

Na Slika 6.10 prikazani su dijagrami naprezanje – progib za sve epruvete



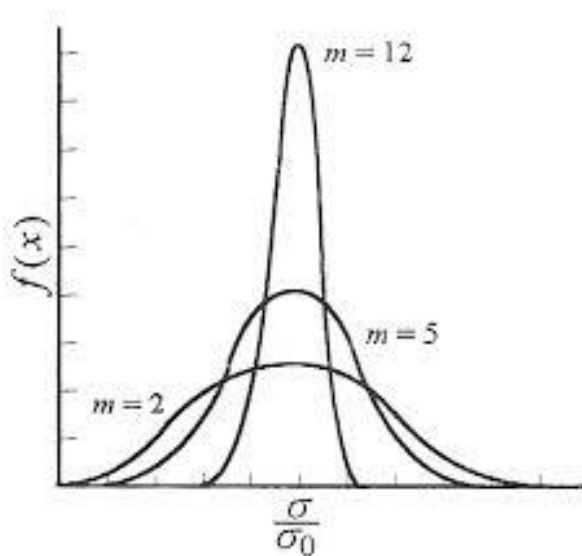
Slika 6.10 Dijagram naprezanje – progib za epruvete skupine C

6.6 Analiza vrijednosti savojne čvrstoće Weibullovom razdiobom

Weibull je razvio teoriju zasnovanu na konceptu otkazivanja funkcije najslabijeg člana, pomoću koje se može vrlo dobro objasniti i pokazati rasipanje savojne čvrstoće naših uzoraka.

Nakon poznavanja parametara razdiobe dobiva se jednoznačna veza između opterećenja i vjerojatnosti loma. Weibullov modul (m) mjera je za rasipanje čvrstoće. Što je Weibullov modul veći, materijal je homogeniji (pogreške su raspodijeljene po cijelom volumen vrlo ravnomjerno), a time je i krivulja razdiobe rasipanja uža.

Uobičajene vrijednosti Weibullova modula (m) su u rasponu $10 < m < 20$. Ovu vrijednost smo kod naših uzoraka određivali savojnim ispitivanjem u tri točke. Slika 6.11 prikazuje utjecaj modula (m) na krivulju Weibelove razdiobe, širina i oblik krivulje ovise o m – što je m veći, razdioba je uža (krivulja je uža).



Slika 6.11 Prikaz ovisnost modula (m) na krivulju Weibelove razdiobe

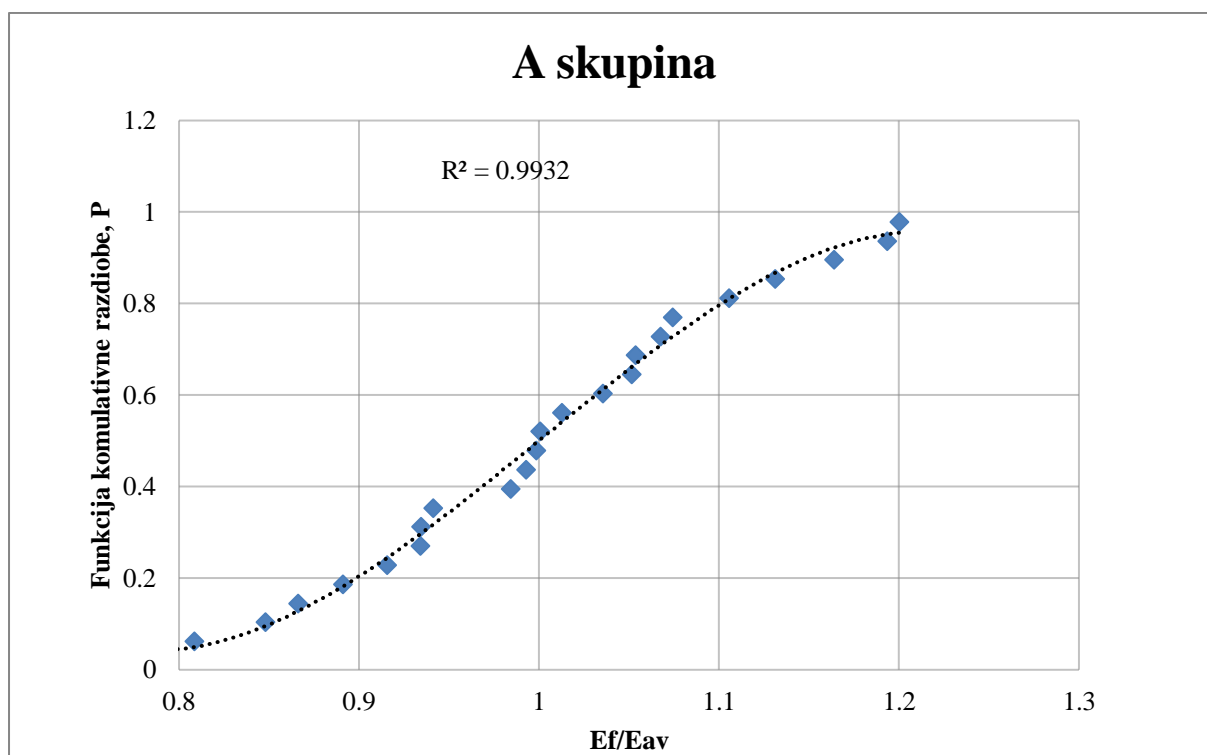
Ova dvoparameterska poluempirijska razdioba je dana izrazom:

$$f(x) = m(x)^{m-1} \exp(-x^m)$$

gdje je $f(x)$ učestalost razdiobe slučajne varijable x , a m je faktor oblika, obično se odnosi na Weibullov modul.

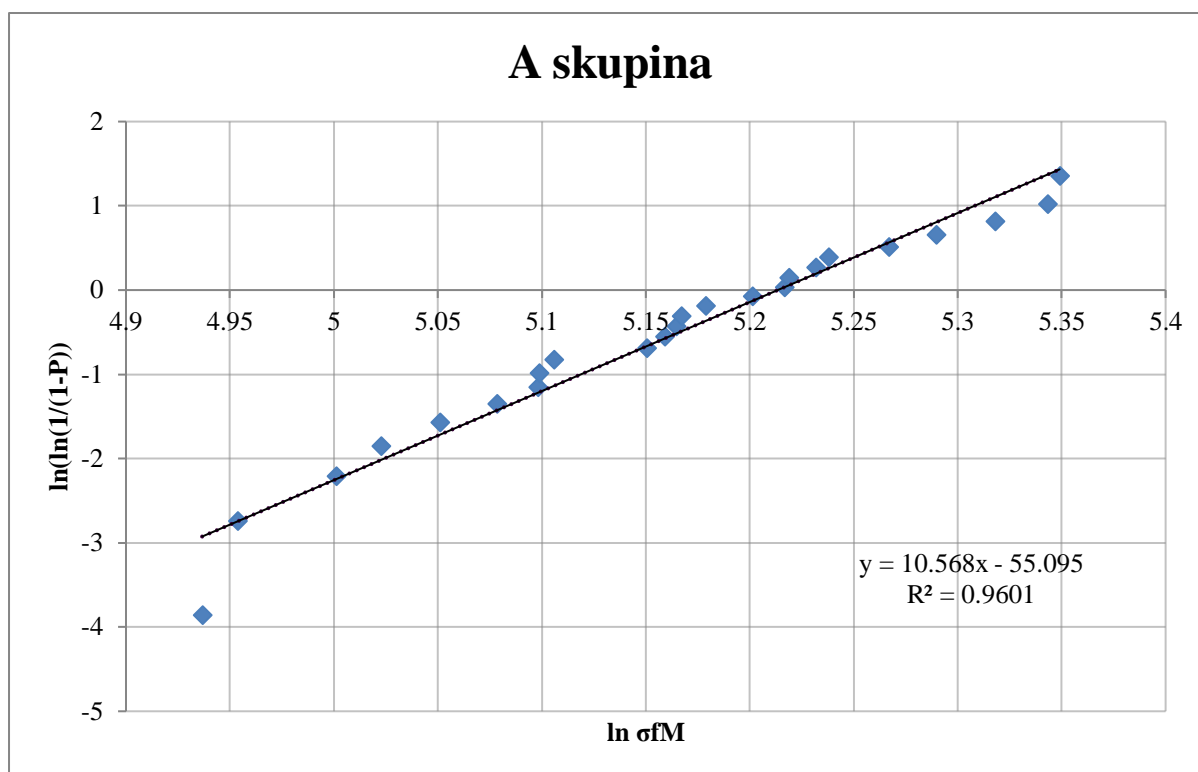
Za svaku skupinu napravljene su dvije vrste dijagrama koje će pobliže pokazati utjecaj godova na savojnu čvrstoću. Prvi dijagrami svake skupine prikazuju komulativnu razdiobu podataka, dok drugi dijagrami prikazuju regresijsku jednadžbu.

Slika 6.12 prikazuje skupinu sa savojnom silom koja je paralelna sa godovima te njen prikaz komulativne razdiobe podataka.



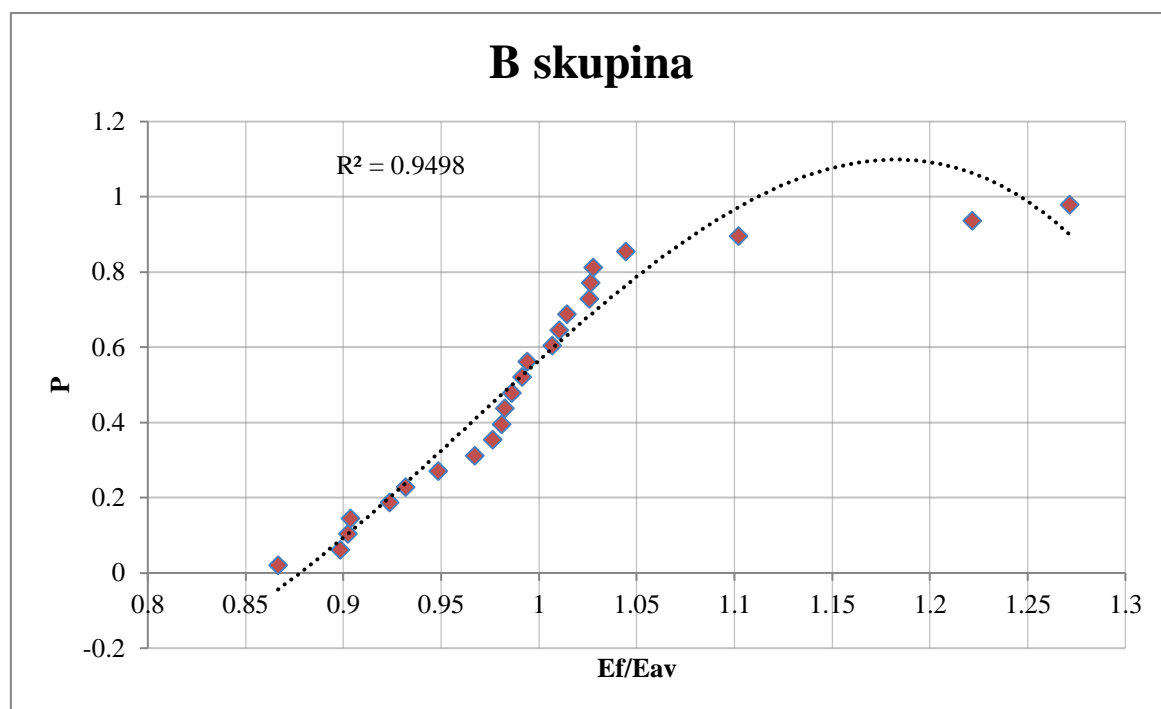
Slika 6.12 Prikaz komulativne razdiobe podataka za savojne čvrstoće A skupine uzoraka

Slika 6.13 prikazuje skupinu sa savojnom silo koja je paralalna sa godovima te njen prikaz regresijske jednadžbe.



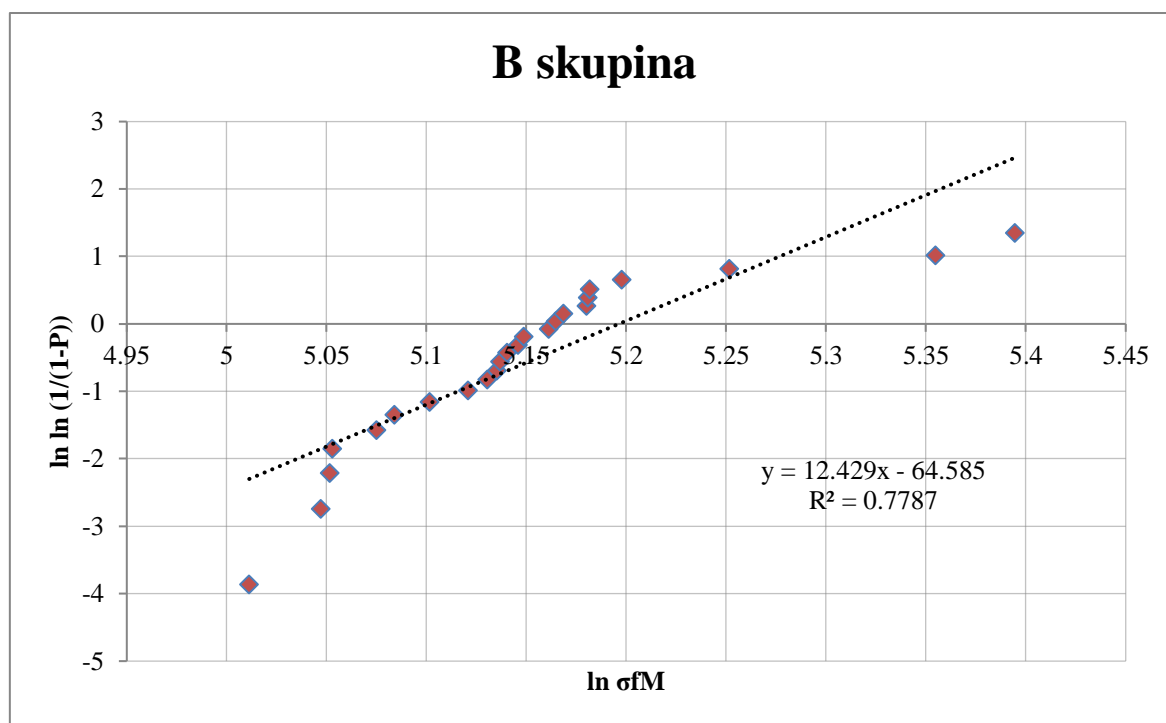
Slika 6.13 Prikaz regresijske enačbe savojne čvrstoće za A skupinu uzoraka

Slika 6.14 prikazuje skupinu sa savojnom silom koja je okomita na godove te njen prikaz komulativne razdiobe podataka.



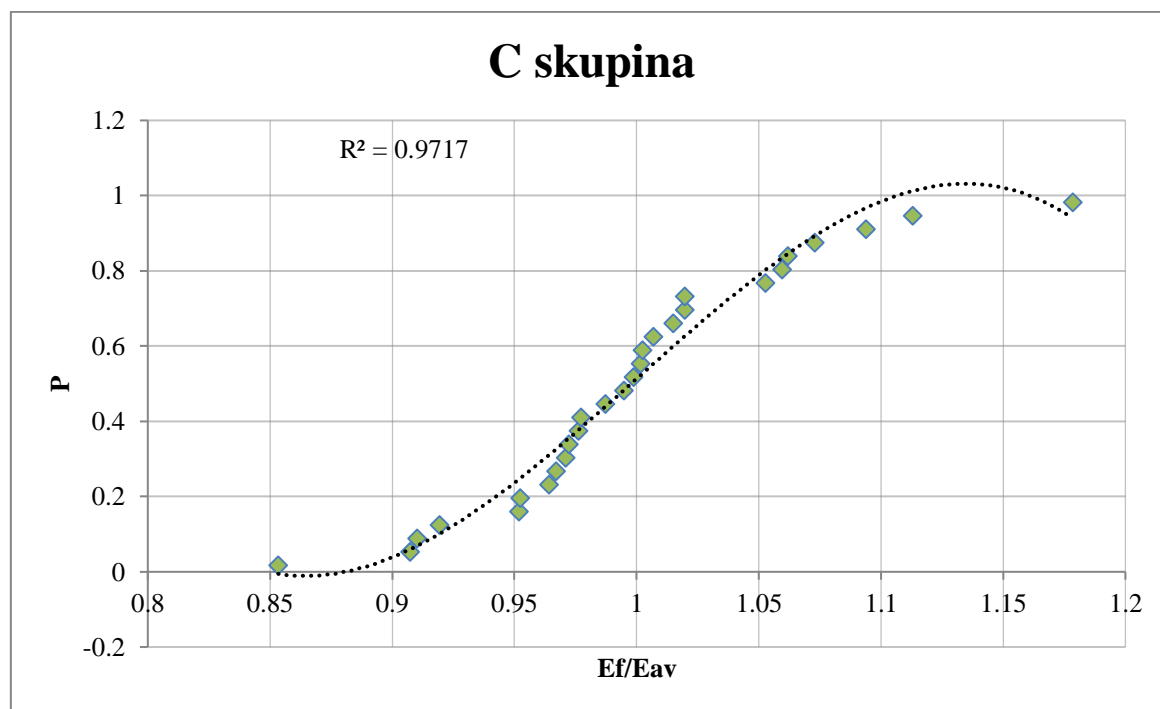
Slika 6.14 Prikaz komulativne razdiobe podataka za savojne čvrstoće B skupine uzoraka

Slika 6.15 prikazuje skupinu sa savojnom silom koja je okomita na godove te njen prikaz regresijske jednadžbe.



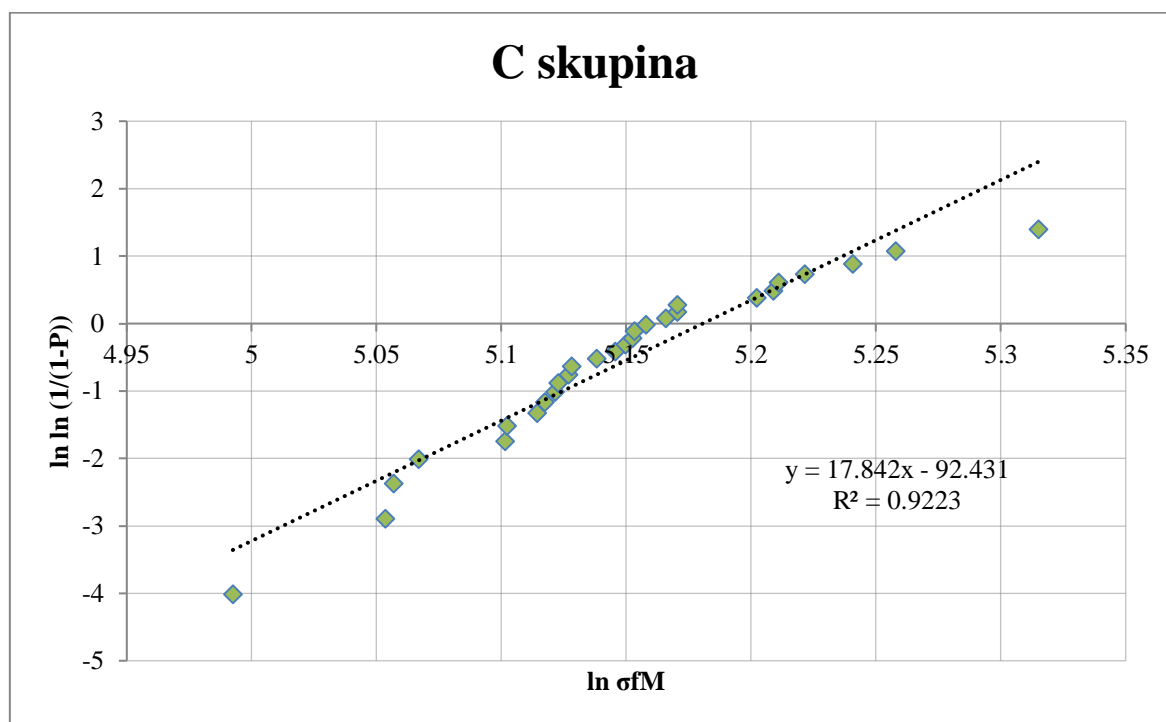
Slika 6.15 Prikaz regresijske jednadžbe savojne čvrstoće za B skupinu uzoraka

Slika 6.16 prikazuje skupinu sa savojnom silom koja je pod kutem od 45° u odnosu na tijek godova te njen prikaz komulativne razdiobe podataka.



Slika 6.16 Prikaz komulativne razdiobe podataka za savojnu čvrstoću C skupine uzoraka

Slika 6.17 prikazuje skupinu sa savojnom silom koja je pod kutem od 45° u odnosu na tijek godova te njen prikaz regresijske jednadžbe.



Slika 6.17 **Prikaz regresijske jednadžbe savojne čvrstoće za A skupinu uzoraka**

7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog ispitivanja i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

1. Vrijednosti savojne čvrstoće hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru kreću se u rasponu od 139,3 i 220,2 N/mm². Srednja vrijednost od svih mjerenja iznosi 173,7172 N/mm².
2. Savojna čvrstoća hrasta lužnjaka, ispitana u logitudinalnom smjeru ovisi o položaju savojne sile u odnosu na tijek godova.
3. Vrijednosti savojne čvrstoće dobivene u slučaju kad je savojna sila u odnosu na tijek godova bila pod kutem od od 45° , kada je savojna sila paralelna sa godovima i kada je savojna sila okomita na godove su približno jednake i iznose 175,3 N/mm² (za 0°), 173,24 N/mm² (za 90°) i 172,61 N/mm² (za 45°).
4. Rezultati dobiveni tijekom ispitivanja mogu se opisati Weibullovom razdiobom. Vrijednosti za Weibullov modul su dovoljno visoke za sve tri skupine i iznose 10,56 za kut od 0°, 17,84 za kut od 45° i 12,42 za kut od 90°. Kod skupine uzoraka s kutom od 45° vrijednost Weibullovog modula je najveća, što znači da ovi uzorci imaju najveću homogenost strukture.

8. LITERATURA

- [1] <http://www.matica.hr/zbivanja/158-maticin-cetvrtak-predavanje-hrast-luznjak-u-turopolju-hrvatskoj-i-europi-1649/>
- [2] Rowell, R. M.: Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, 2005.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose_fiber
- [4] <http://www.sumari.hr/sumlist/pdf/200102630.pdf>
- [5] Spalt, H.A.: Fundamentals of water vapor sorption by wood, Forest Prod. J. 8(10): 288-295, 1958.
- [6] Skaar, C. Wood-water relationships, The Chemistry of Solid Wood, R.M. Rowell (Ed.), Advances in Chemistry Series, American Chemical Society, Washington, DC, 207, 125-174, 1984.
- [7] HRN EN 350-2.- Trajnost drva i proizvoda na osnovi drva - Prirodna trajnost masivnog drva
- [8] https://bib.irb.hr/datoteka/610088.Ponaanje_drvenih_konstrukcija_u_uvjetima_poara_i_otpornost_na_djelovanje_poara.pdf
- [9] I. Horvat, I. *Tehnologija drva*, Drvnoindustrijski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb
- [10] <http://teachingresources.grantadesign.com/charts>
- [11] http://www.materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-toughness/basic.html
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_mechanics
- [13] ASTM D1037-12 - Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials
- [14] <http://www.hoskinghardwood.com/Department/Hardwood-Floors/Janka-Wood-Hardness-Chart.aspx?dId=7&pageId=12>
- [15] HRN EN 1534:2010 – Određivanje otpornosti na utiskivanje (Brinell)-metoda ispitivanja
- [16] Rede, V.; Essert, S.; Šokčević, Z.: Effects of microstructural orientation on the abrasive wear resistance of subfossil elm wood in three orthogonal planes , *Wear*, 380/381; 2017.
- [17] <https://bs.wikipedia.org/wiki/Prahistorija>
- [18] <http://slavonski-hrast.com/novosti/spacvanski-bazen-najveca-suma-hrasta-u-europi/>
- [19] <https://www.shtreber.com/delovi-biljke-stablo>
- [20] http://bonsai-zen.hr/category/osnovne_bonsai_tehnike/page/4/
- [21] Rede, V. : Mehanička svojstva drva
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1402046311-0-drvo_vjeza_14.pdf

[22] <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/pendulum-charpy-impact-machine-mass-53-kg-radius-gyration-ka-175-m-released-rest-theta-25d-q1394948>